

Izmjena energije na granici atmosfera - more u sjevernom, srednjem i južnom Jadranu

Galić, Sebastian Antun

Master's thesis / Diplomski rad

2019

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Split / Sveučilište u Splitu**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:226:898754>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-09-27**



Repository / Repozitorij:

[Repository of University Department of Marine Studies](#)



UNIVERSITY OF SPLIT



**SVEUČILIŠTE U SPLITU
SVEUČILIŠNI ODJEL ZA STUDIJE MORA
DIPLOMSKI STUDIJ MORSKO RIBARSTVO**

Sebastian Antun Galić

**IZMJENA ENERGIJE NA GRANICI ATMOSFERA –
MORE U SJEVERNOM, SREDNJEM I JUŽNOM
JADRANU**

Diplomski rad

Split, svibanj 2019.

**SVEUČILIŠTE U SPLITU
SVEUČILIŠNI ODJEL ZA STUDIJE MORA
DIPLOMSKI STUDIJ MORSKO RIBARSTVO**

**IZMJENA ENERGIJE NA GRANICI ATMOSFERA –
MORE U SJEVERNOM, SREDNJEM I JUŽNOM
JADRANU**

Diplomski rad

Predmet: Osnove meteorologije

Mentor:

Doc. dr. sc. Frano Matić

Student:

Sebastian Antun Galić

Split, svibanj 2019.

Sveučilište u Splitu
Sveučilišni odjel za studije mora
Diplomski studij Morsko ribarstvo

Diplomski rad

**IZMJENA ENERGIJE NA GRANICI ATMOSFERA – MORE U SJEVERNOM,
SREDNJEM I JUŽNOM JADRANU**

Sebastian Antun Galić

Sažetak

Ovaj rad donosi prikaz izmjena energija tj. tokova topline na granici atmosfere i mora za odabranu točku na području srednjeg Jadrana. Obradeni podaci preuzeti su iz specifičnih globalnih spektralnih modela. Obradom podataka dobiveni su odgovori na pitanja u vezi funkcioniranja termohaline cirkulacije, ventilacije pridnenih slojeva te procesa grijanja i hlađenja površinskih slojeva mora. Svi navedeni procesi su uvelike značajni za ekosustav Jadrana. Računati su klizni srednjaci i anomalije te su radi lakše analize prikazani na linijskim grafovima. Analizom su utvrđene sezonske, godišnje, a zatim i dekadne, fluktuacije tokova topline uvjetovane položajem Sunca prema promatranoj točki te globalnim klimatskim promjenama.

(30 stranica, 17 slika, 3 tablice, 21 literaturni navod, jezik izvornika: hrvatski)

Ključne riječi: Jadransko more, izmjena energije atmosfera - more, evaporacija

Mentor: Doc. dr. sc. Frano Matić

Ocjenjivači: 1. Doc. dr. sc. Maja Krželj
2. Doc. dr. sc. Frano Matić
3. Dr. sc. Jadranka Šepić

University of Split
Department of Marine Studies
Graduate study Marine Fishery

MSc Thesis

**AIR – SEA INTERACTION IN THE NORTHERN, MIDDLE AND SOUTH
ADRIATIC SEA**

Sebastian Antun Galić

Abstract

This paper gives an overview of the energy changes, i.e. the heat flux between atmosphere and the sea for selected point on area of the Middle Adriatic. Analyzed data are taken from specific global spectral models. The processing of the data provided answers to the questions regarding the functioning of thermohaline circulation, ventilation of the bottom layers and the process of heating and cooling of the sea surface. All these processes are of great importance for the Adriatic ecosystem. The averages and anomalies data are calculated, analyzed and visualized on line graphics. The analysis determined the seasonal, annual and decadal, fluctuations of the heat flux.

(30 pages, 17 figures, 3 tables, 21 references, original in: Croatian)

Keywords: Adriatic Sea, air-sea interaction, evaporation

Supervisor: Frano Matić, PhD / Assistant Professor

Reviewers:

1. Maja Krželj, PhD / Assistant Professor
2. Frano Matić, PhD / Assistant Professor
3. Jadranka Šepić, PhD / Research Assistant

SADRŽAJ:

1. UVOD	1
1.1. Dosadašnja istraživanja	1
1.2. Svrha i ciljevi rada	4
2. MATERIJALI I METODE	5
2.1. Materijali	5
2.2. Metode	7
2.2.1. Kratkovalno Sunčevo zračenje	8
2.2.2. Dugovalno zračenje Zemlje	9
2.2.3. Latentna energija	9
2.2.4. Senzibilna energija	10
3. REZULTATI I RASPRAVA	11
3.1. Kratkovalno Sunčevo zračenje	11
3.2. Dugovalno zračenje Zemlje	13
3.3. Latentna energija	15
3.4. Senzibilna energija	17
3.5. Tokovi energije u veljači	18
3.6. Sezonski tokovi energije	21
3.7. Anomalije tokova energije	25
4. ZAKLJUČCI	28
5. LITERATURA	29

1. UVOD

1.1. Dosadašnja istraživanja

U ovom radu prikazana je izmjena energije na granici atmosfere i mora u odabranoj reprezentativnoj točki na području srednjeg Jadrana. Analizirani su dostupni podaci spektralnih modela koji se temelje na satelitskim mjerenjima. Izmjena energije u Zemljinoj atmosferi i na njezinoj granici s površinom, bilo kopnenom ili morskom, odvija se pomoću četiri procesa: (I) kratkovalno Sunčevo zračenje, (II) dugovalno zračenje Zemlje, (III) latentna izmjena topline i (IV) senzibilna izmjena topline.

Energija je sposobnost nekog tijela ili sustava da obavi rad tj. veličina koja karakterizira gibanje, mirovanje ili položaj tijela ili sustava čestica. Ona se ne može potrošiti ni stvoriti već samo promijeniti svoj oblik. U ovom radu je korištena ukupna energija koju neko tijelo temperature T zrači po jedinici površine [m^2] u jedinici vremena, što odgovara pojmu intenziteta emitiranog zračenja tj. gustoće snage emitiranog zračenja. Jedinica za energiju je [W/m^2]. Pri tome se energija ne emitira s jednakim intenzitetom na svim valnim duljinama koje pripadaju toplinskome spektru (Kalea, 2014).

Promatrani tok emitiranog zračenja (Q) predstavlja energiju koja u jedinici vremena prođe kroz plohu površine A . Ovisno o njihovoj temperaturi, sve tvari emitiraju energiju u obliku zračenja. Ako dio energije emitiraju u vidljivom dijelu elektromagnetskog spektra tvari su vidljive (Kulišić i Lopac, 2003). Oblik spektralne krivulje, njena površina i maksimum ovise o temperaturi tijela. Viša temperatura implicira spektar zračenja kraćih valnih duljina, a niža temperatura dužih. Elektromagnetsko zračenje koje emitira Sunce (temperature oko 6000 K) je kratkovalno, dok je Zemljino elektromagnetsko zračenje (temperature 289 K) dugovalno (Stacey i Davis, 2008).

Kratkovalno Sunčevo zračenje (Q_s) je posljedica emitiranja energije sa površine Sunca. Količina energije koja dolazi na vrh atmosfere je približno konstantnog iznosa te iznosi $1370 \text{ W}/\text{m}^2$ i naziva se Solarna konstanta (Dobson i Smith, 1985). Solarna konstanta nije stvarna konstanta već se mijenja na godišnjoj, višegodišnjoj, dekadnoj i milenijskoj skali. Ovisno o skali, promjene solarne konstante uzrokuju promjene klime te su jedan od razloga za pojavljivanje toplih i hladnih razdoblja, odnosno ledenih doba.

Kod kratkovalnog Sunčevog zračenja 31 % energije atmosfera reflektira pomoću oblaka, 17,5 % energije atmosfera apsorbira, 47,5 % energije biva preneseno na Zemljinu površinu te apsorbirano dok se preostalih 4 % reflektira od Zemljine površine. Pojam dolazno kratkovalno Sunčevo zračenje (Q_{s_DW}) obuhvaća svo Sunčevo zračenje dospjelo do površine Zemlje, a dio koji se reflektira natrag naziva se povratno kratkovalno Sunčevo zračenje (Q_{s_UW}). Dolazno kratkovalno sunčevo zračenje ovisi o kutu upada dolaznog zračenja na površinu Zemlje, odnosno o geografskoj širini, dobu dana, dijelu godine, astronomskim varijacijama nagnutosti Zemljine osi i astronomskim varijacijama njenog položaja prema Suncu (Stacey i Davis, 2008).

Nakon prolaska kroz atmosferu Sunčevo zračenje nailazi na tlo ili vodenu površinu (more, rijeke, jezera). Određeni dio zračenja će se odbiti (reflektirati) ovisno o svojstvima podloge na koju naiđe. Svojstvo podloge da odbije zračenje možemo izraziti koeficijentom refleksije ili albedom. Albedo vodene površine ovisi o kutu upada kratkovalnog zračenja a za prosječnu vrijednost se uzima 0,07. Sunčevo zračenje koje dođe na površinu mora dijelom biva reflektirano, dok se ostatak apsorbira uglavnom u prvom metru dubine (65 %), 22 % zračenja dosegne dubinu od 10 m, dok na 100 m dubine dospije samo 0,5 % zračenja.

Za razliku od kratkovalnog Sunčevog zračenja, Zemljino je dugovalno. Zemljini elektromagnetski valovi su 15 do 20 puta veće valne duljine od kratkovalnih Sunčevih. Atmosfera je propusna za kratkovalno te nepropusna ili teško propusna za dugovalno zračenje. Upravo je to razlog zbog kojeg se velik dio dugovalnog zračenja Zemlje odbije od atmosfere i vrati natrag prema Zemlji. Dugovalno zračenje Zemlje (Q_L), bilo kopnenih, bilo morskih površina je energija koju zrači Zemlja prema svemiru. Maksimum ovog zračenja nalazi se u području infracrvenog zračenja (Andrassy i sur., 2008).

Efekt staklenika značajno utječe na dugovalno zračenje Zemlje. Staklenički plinovi u atmosferi (poput vodene pare, metana, ugljikovog dioksida) apsorbiraju većinu odlaznog dugovalnog zračenja Zemlje (Q_{L_UW}), uslijed čega se zagrijavaju niži slojevi atmosfere. Zagrijani slojevi atmosfere emitiraju dugovalno zračenje malim dijelom prema Svemiru a većim dijelom natrag prema Zemljinoj površini, što nazivamo povratno dugovalno Zemljino zračenje (Q_{L_DW}). Taj efekt održava planet toplim te omogućuje razvoj života kakav danas poznajemo. Da nema učinka staklenika prosječna temperatura na Zemlji bi bila i do 30 °C niža (Sijerković, 1991). Zajednička značajka svih stakleničkih plinova je da otežavaju izlazak dugovalnog toplinskog zračenja Zemlje. Zbog povećanog stvaranja CO₂ kao posljedice industrijalizacije tijekom posljednjih stotinjak godina efekt staklenika se povećao i doveo do antropogenih klimatskih promjena (Lutgens i sur., 2015).

Toplinska energija koja se prenosi vođenjem (kondukcijom) ili prenošenjem (konvekcijom) s tijela, čija temperatura je viša u odnosu na okolnu temperaturu, naziva se senzibilna toplina. Izmjena topline vođenjem (Q_C) na granici mora i atmosfere je posljedica različitih temperatura mora i atmosfere. More je u prosjeku toplije $0,8^\circ\text{C}$ od zraka, pa je stoga i prijenos topline vođenjem usmjeren iz mora prema atmosferi. Osim toga, zbog njenog nižeg specifičnog toplinskog kapaciteta, mnogo je lakše zagrijati atmosferu nego more. Uz to se zagrijani zrak konvektivno uzdiže u atmosferu te prenosi energiju u više slojeve, dok se zagrijani sloj mora zadržava na površini pojačavajući stabilnost stupca mora.

Latentna toplina je toplina koju neka masa tvari mora predati ili primiti iz okoline kako bi promijenila agregatno stanje. Okolina predaje (gubi) latentnu energiju kada tijelo prelazi iz krutog u tekuće ili plinovito, ili iz tekućeg u plinovito stanje. Pri prijelazu iz plinovitog u tekuće ili kruto te iz tekućeg u kruto, latentna toplina tijela se oslobađa. Latentna energija isparavanja (evaporacija) je toplinska energija upotrijebljena kako bi voda promijenila agregatno stanje iz tekućeg u plinovito, što implicira na to da je evaporacija s površine mora proces hlađenja. Latentna toplina kondenzacije je toplinska energija koja se oslobađa za vrijeme prelaska iz plinovitog u tekuće agregatno stanje. Kondenzacija je dakle proces zagrijavanja. Latentna toplina (Q_E) upotrijebljena za proces isparavanja je mehanizam prijenosa energije iz mora u atmosferu. Prilikom isparavanja more se, dakle, hladi. Isparavanje je posljedica nezasićenosti zraka vodenom parom zbog čega postoji prijenos vode i energije iz mora u atmosferu. Upravo je proces isparavanja bitan faktor kod bilance vode na površini mora (Lutgens i sur., 2015). Prilikom isparavanja energija i vodena para prenose se vjetrovima i konvekcijom u više dijelove atmosfere. Proces isparavanja, pa samim time i procesi prijenosa toplinske energije, su izraženiji za atmosferskih prilika karakteriziranih većim brzinama vjetra, manjom zasićenošću zraka vodenom parom te većim temperaturama zraka (zbog toga što topliji zrak može primiti više vodene pare) (Lutgens i sur., 2015). Oborine i pritoci slatke vode nadmašuju isparavanje (evaporaciju) u Jadranu što uzrokuje sniženje saliniteta, dok dotoci slane mediteranske vode kroz Otrantska vrata povećavaju pak salinitet. Salinitet je zbog toga viši u južnom Jadranu a niži u sjevernom Jadranu koji je pod snažnim utjecajem dotoka rijeke Po. Klimatološki gledano strujanje u Jadranu odvija se u "ciklonalnom" smjeru (obrnuto od kazaljke na satu). Uz istočnu obalu se javlja ulazno strujanje koje transportira slanu levantinsku vodu u Jadran, dok se uz zapadnu obalu odvija izlazno strujanje, tj. istjecanje manje slane vode iz Jadrana. Uzrok ove opće cirkulacije su gradijentske struje i sezonske promjene smjera vjetra, pa je ljeti izraženiji izlazni tok, a zimi ulazni tok (Orlić i sur., 1992; Vilibić i Orlić, 2002).

Procesi izmjene energije između atmosfere i mora značajno utječu na izmjenu vodenih masa u Jadranu te na ventilaciju dubokih slojeva Jadrana i koncentraciju kisika. Tijekom zime, za vrijeme epizoda bura, Jadransko more intenzivno gubi energiju, hladi se i usred isparavanja mu se povećava salinitet. Proces je najintenzivniji na Sjevernom Jadranu zbog činjenice da su tu zabilježeni najjači udari bure (Trščanski zaljev i Kvarnerić). Ovisno o tipu bure intenzivno se hlade i ostali dijelovi Jadrana. Novostvorena vodena masa, ohlađena i bogata kisikom zbog svoje velike gustoće tone na dno vodenog stupca te ciklonalnom cirkulacijom, uz talijansku obalu, istječe iz Jadrana. Na putu prema Otrantu dio vode tone na dno Jabučke kotline, gdje se i zadržava, a dio odlazi u južni Jadran te kroz Otrantska vrata napušta Jadransko more. Istjecanje hladne i guste vode iz Jadrana potiče ulazak vodene mase iz Jonskog u Jadransko more. Vodena masa koja ulazi iz Jonskog mora donosi toplije i slanije, ali kisikom siromašnije, more. Pojačan ulazak levantinske vodene mase naziva se jadranska ingresija (Vilibić i sur., 2018).

Tijekom prethodnih 70-ak godina oscilacije karakteristika vodenih masa, tj. temperature i saliniteta, mijenjale su se na dekadnoj i međugodišnjoj skali. Salinitet je parametar koji se pokazao kao konzervativniji tj. sporije se mijenja, dok su promjene temperature brže i odvijaju se na međugodišnjoj skali (Matić i sur., 2017). Osim za kontrolu vodenih masa u intermedijalnom sloju, izmjena energije i vodene mase važna je i za površinski sloj. Tako, primjerice, intenzivno zagrijavanje mora, kao posljedica smanjene evaporacije zbog izostanka bura i slabog maestrala u ljetnom razdoblju, rezultira iznimno visokim površinskim temperaturama mora (Grbec i sur., 2018).

1.2. Svrha i ciljevi rada

Cilj rada je proučiti procese izmjene energije na granici atmosfere i mora, procese odgovorne za modulaciju termohaline cirkulacije, ventilaciju pridnenih slojeva mora te procese grijanja i hlađenja površinskih slojeva. Zbog širine utjecaja spomenutih procesa oni su iznimno važni za cjelokupni ekosustav Jadrana. Njihovom analizom na međugodišnjoj i međudekadnoj vremenskoj skali moći će se odrediti različita razdoblja važna za ekosustav Jadrana.

2. MATERIJALI I METODE

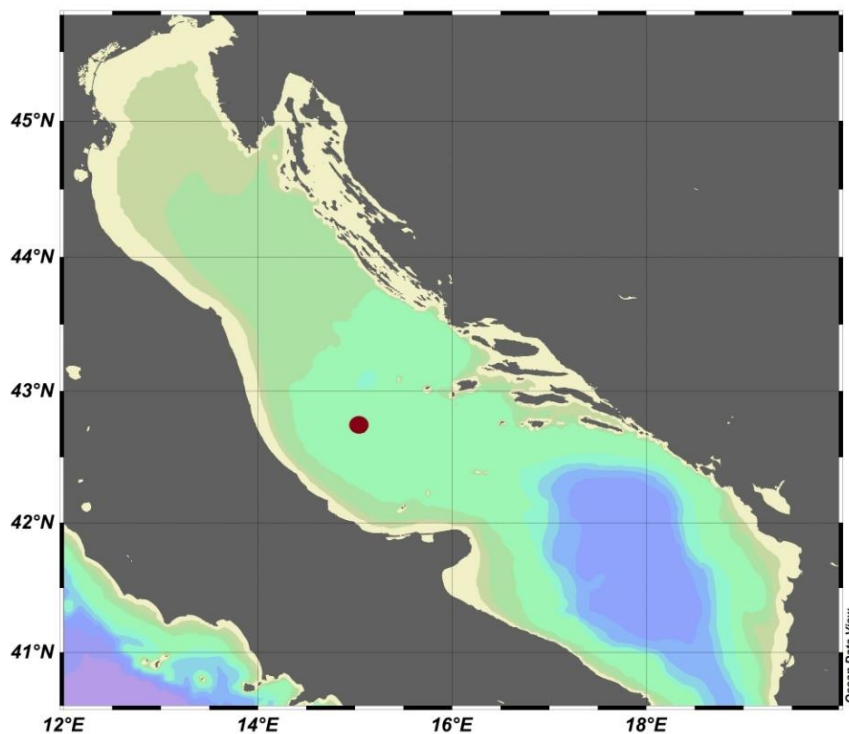
2.1. Materijali

Za izradu ove studije upotrijebljeno je 6 skupina podataka s 3 lokacije na Jadranu međutim, zbog velike količine podataka, za detaljno promatranje i analizu, odabrana je samo točka smještena na srednjem Jadranu. Korišteni podaci su : kratkovalno dolazno i povratno Sunčevo zračenje, dugovalno odlazno i povratno zračenje Zemlje, latentna te senzibilna energija. Podaci su preuzeti iz NCEP-DOE Reanaliza 2 (NCEP – nacionalni centar za okolišno predviđanje, DOE – odjel za energiju) baze podataka *NOAA/OAR/ESRL PSD, Boulder, Colorado, USA*, (<https://www.esrl.noaa.gov/psd/>). NCEP-DOE Reanaliza 2 predstavlja poboljšanu verziju modela NCEP Reanaliza I, u kojoj su ispravljene pogreške i ažurirane parametrizacije fizičkih procesa.

Podaci su dobiveni globalnom klimatskom simulacijom pomoću NCEP globalnog spektralnog modela koji koristi Zemljinu površinsku parametrizaciju (LSP) kao reanalizu. Hidrološki model je model varijabilnog infiltratorskog kapaciteta (VIC) koji je poguran mrežom promatranih padalina i temperatura. Ona reproducira promatrani tok strujanja a zatvaranjem je ograničeno da uravnoteži druge uvjete u površinskim vodama i energetskim proračunima. VIC-simulirani površinski tokovi stoga pružaju mjerilo za procjenu predviđanja iz reanalize i klimatskih modela (Maurer i sur., 2001).

Projekt NCEP-DOE Reanaliza 2 koristi najsvremenije sustave analize i prognoze za obavljanje asimilacije podataka, korištenjem podataka od 1979. do prethodne godine. Vremenska pokrivenost je u formatu 4 puta na dnevnoj bazi pomoću čega su dobiveni mjesečni prosjeci za razdoblje od 1979./01. do 2017./12. koji su korišteni u ovom radu. Analizirani su podaci s površine mora.

Analizirani su podaci za jednu reprezentativnu postaju lociranu na prostoru srednjeg Jadrana (Slika 1.). Promatrana postaja nalazi se 30-ak nautičkih milja (1 nautička milja = 1,852 km) W-SW (zapadno – jugozapadno) od našeg udaljenog pučinskog otoka Sveca. Radi lakšeg razumijevanja, korišteni podaci, poput vrsti zračenja i promjena energija te njihove skraćene oznake su tabelarno prikazani (Tablica 1.).



Slika 1. Prikaz promatrane postaje (15° E, 42.8563995° N) kod analize izmjene i protoka energije srednjeg Jadrana

Tablica 1. Prikaz podataka komponenti zračenja za točku $15^{\circ}00'00.0''$ istočne geografske dužine i $42^{\circ}51'23.0''$ sjeverne geografske širine.

Tip zračenja - skraćenica	Tip zračenja	Razdoblje dostupnosti	Izvor podataka
Q_{S_DW}	Kratkovalno dolazno Sunčevo zračenje	1979 - 2017	NCEP-DOE Reanaliza 2
Q_{S_UW}	Kratkovalno povratno Sunčevo zračenje	1979 - 2017	NCEP-DOE Reanaliza 2
Q_{L_DW}	Dugovalno povratno zračenje Zemlje	1979 - 2017	NCEP-DOE Reanaliza 2
Q_{L_UW}	Dugovalno odlazno zračenje Zemlje	1979 - 2017	NCEP-DOE Reanaliza 2
Q_E	Latentna energija	1979 - 2017	NCEP-DOE Reanaliza 2
Q_C	Senzibilna energija	1979 - 2017	NCEP-DOE Reanaliza 2

2.2. Metode

U ovom poglavlju opisane su metode izračuna tokova energije tj. topline u atmosferi i na njenoj granici s površinom. Zbog velikog broja dostupnih formula nema suglasnosti koje točno formule koristiti, a prilikom uporabe formula često se pojavljuju greške koje autori pokušavaju otkriti te ukloniti ili barem umanjiti.

Površinski tokovi topline izračunavaju se primjenom različitih „bulk formula“ korištenjem meteoroloških i oceanografskih podataka. Kod izračuna ukupnog toka energije (Q_{UK}) koriste se četiri parametra, a to su Sunčevo kratkovalno zračenje (Q_S), Zemljino dugovalno zračenje (Q_L), ukupna latentna (Q_E) te senzibilna energija (Q_C). Ukupni tok energije (topline) dobije se kao:

$$Q_{UK} = Q_S + Q_L + Q_E + Q_C$$

$$Q_S = Q_{S_DW} - Q_{S_UW} \quad Q_L = Q_{L_UW} - Q_{L_DW}$$

Potrebno je napomenuti kako je tok topline glavninom kontroliran Sunčevim zračenjem, oblačnošću, temperaturom zraka i mora, brzinom vjetra i vlažnošću zraka. Q_S i Q_L su definirani kao razlika dolaznog i odlaznog kratkovalnog Sunčevog zračenja (Q_{S_DW} , Q_{S_UW}), odnosno kao razlika odlaznog i povratnog dugovalnog zračenja Zemlje (Q_{L_UW} , Q_{L_DW}). Valja napomenuti, kako se, s obzirom na navedeno, za izmjenu topline kratkovalnim Sunčevim zračenjem (Q_S) koriste pozitivni predznaci jer tada Zemlja dobiva energiju, dok se za ostale komponente: dugovalno Zemljino zračenje (Q_L), izmjena senzibilne energije (Q_C) i izmjena latentne energije (Q_E), koriste negativni predznaci jer tim trima tokovima promatrana točka na Jadranu dominantno gubi energiju. Ukupni tok energije je pozitivan kada površina prima energiju, a negativan kada je predaje.

Osim osnovnih izračuna tokova energije i njihovih srednjaka, računate su i njihove nepravilnosti. Te nepravilnosti, odnosno odstupanja od srednjaka, su meteorološke tj. klimatske anomalije. Ekstremne vrijednosti se javljaju kada pojedini atmosferski ili oceanografski parametar posjeduje izrazito višu ili nižu vrijednost od uobičajene (srednje) vrijednosti u višedekadnom razdoblju. Anomalije su izračunate tako što su od niza srednjih mjesečnih vrijednosti nekog parametra oduzimani srednjaci srednjih mjesečnih vrijednosti tog parametra, te su dobivene vrijednosti podijeljene sa standardnom devijacijom istog tog niza. Anomalije su značajne jer ukazuju na neobičnosti i promjene karakteristične za određena razdoblja.

2.2.1. Kratkovalno Sunčevo zračenje

Kratkovalno Sunčevo zračenje (Q_s) je mjerna veličina koja se može mjeriti, ali i dobiti putem modelskih izračuna. Sve ostale komponente uvijek zahtijevaju izračun primjenom različitih formula. Kada govorimo o mjerenju, Sunčevo zračenje se može mjeriti piranometrom. Piranometar je uređaj koji mjeri ukupno Sunčevo zračenje koje pada na neku vodoravnu plohu (na svim valnim duljinama).

Samo dio Sunčevog zračenja koje dođe do vrha Zemljine atmosfere uspijeva doći do Zemljine površine. Velik dio se rasprši, a dio apsorbiraju i reflektiraju oblaci i plinovi u atmosferi. Što je oblačnost veća, manje Sunčeve energije stiže do površine Zemlje (Penzar i sur., 1996).

Ångström, znanstvenik iz 20. stoljeća dao je empirijski model kojim se, koristeći podatke o insolaciji (vremenskom trajanju obasjanosti horizontalne plohe izravnim Sunčevim zračenjem) i Sunčevom zračenju na vrhu atmosfere, može izračunati dnevna količina dozračene Sunčeve energije na horizontalnu plohu jedinične površine:

$$\frac{Q_s}{I_0} = a + b \frac{s}{s_0}$$

pri čemu je Q_s prosječna dnevna količina dozračene Sunčeve energije na površini Zemlje, I_0 prosječno dnevno Sunčevo zračenje na vrhu atmosfere, s je heliografom određeno trajanje osunčavanja, a s_0 najveće moguće dnevno trajanje osunčavanja, dok su a i b regresijski parametri dobiveni analizom. Regresijski parametri predstavljaju propusnost atmosfere.

Uz formule iz Ångströmove jednadžbe, postoji i niz drugih formula za izračunavanje i procjenu Sunčevog zračenja. Razlikuju se po vremenskoj skali za koju je Sunčevo zračenje izračunato (satne, dnevne i mjesečne) te po parametrima potrebnima za njihovo izračunavanje (Kimball, 1928; Lumb, 1964; Tabata, 1964). U ovom radu su korištene dnevne i mjesečne srednje vrijednosti kratkovalnog Sunčevog zračenja te je zbog toga bitno istaknuti kako se za njihovo izračunavanje najčešće upotrebljava empirijska formula predložena od Reed-a, koju su Gilman i Garrett prilagodili za upotrebu na području Mediterana:

$$Q_s = Q_0 Tr(1 - 0.637n + 0.0019h)(1 - \alpha)$$

gdje je Q_s prosječna dnevna količina dozračene Sunčeve energije na površini Zemlje, $Q_0 Tr$ zračenje za vedroga neba ovisno o dobu godine i geografskoj širini, n prekrivenost neba oblacima u desetinama, h visina sunca izražena u stupnjevima, a α albedo površine mora koji u Jadranu iznosi 0.08.

2.2.2. Dugovalno zračenje Zemlje

Dugovalno Zemljino zračenje (Q_L) može se izračunati nizom različitih formula. Najčešće se koristi set jednadžbi znanstvenika Gill-a (1982), prema kojima je izvedena formula:

$$Q_L = 0.985\sigma T^4(0.39 - 0.05\sqrt{e})(1 - 0.6N^2)$$

gdje je σ Stefan-Boltzmannova konstanta koja iznosi ($5.67 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$), T je temperatura površine izražena u Kelvinima, N naoblaka izražena u desetinama, dok je e tlak vodene pare u atmosferi pri površini mora izražen u milibarima.

Kod računanja dugovalnog zračenja potrebno je poznavati tlak, temperaturu, vlažnost zraka, temperaturu površine mora i naoblaku. Naoblaka je najbitniji parametar kod računanja dugovalnog zračenja, pri čemu u formule ulazi ukupan iznos naoblake, odnosno ukupna pokrivenost neba oblacima bez obzira na tip oblaka (Laevastu, 1967).

2.2.3. Latentna energija

Promjena latentne topline (Q_E) spada u turbulentne tokove energije te je njeno mjerenje vrlo teško. Latentna toplina isparavanja (evaporacije) je utrošena toplinska energija te je to proces hlađenja. Kako bi izmjerili isparavanje površine mora potrebno je izolirati površinu kako bi onemogućili horizontalne protoke vodene pare u i van analiziranog područja. Stoga se tok latentne topline najčešće računa iz drugih podataka. Postoji niz jednadžbi koje se koriste u ovom računu, no velika većina njih je osjetljiva na pogrešku uzrokovanu pogrešnom procjenom brzine vjetra.

Analiziranjem različitih jednadžbi kod izračunavanja toka topline evaporacijom, određena je navedena poluempirijska jednadžba kao najprihvatljivija:

$$Q_E = -L_v C_E \rho u (\rho_v - \rho_a)$$

gdje je L_v latentna toplina isparavanja približnog iznosa $2.5 \times 10^6 \left[\frac{J}{kg} \right]$, C_E predstavlja konstantni Daltonov broj koji iznosi 1.5×10^{-3} (Gill, 1982; Large, 1996), ρ je gustoća zraka aproksimirana konstantnim iznosom $1.25 \frac{kg}{m^3}$, u je brzina vjetra, ρ_v je specifična vlažnost zraka, a ρ_a specifična vlažnost zraka zasićenog vodenom parom na temperaturi površine mora.

2.2.4. Senzibilna energija

Još jedan od turbulentnih tokova energije je i prijenos energije vođenjem (kondukcijom). Ta energija, koja se prenosi zbog postojanja razlike u temperaturi, primjerice more – atmosfera, se naziva senzibilna energija. Izmjenu senzibilne topline vođenjem izračunavamo pomoću formule:

$$Q_C = C_H c_p \rho u (T_w - T_a)$$

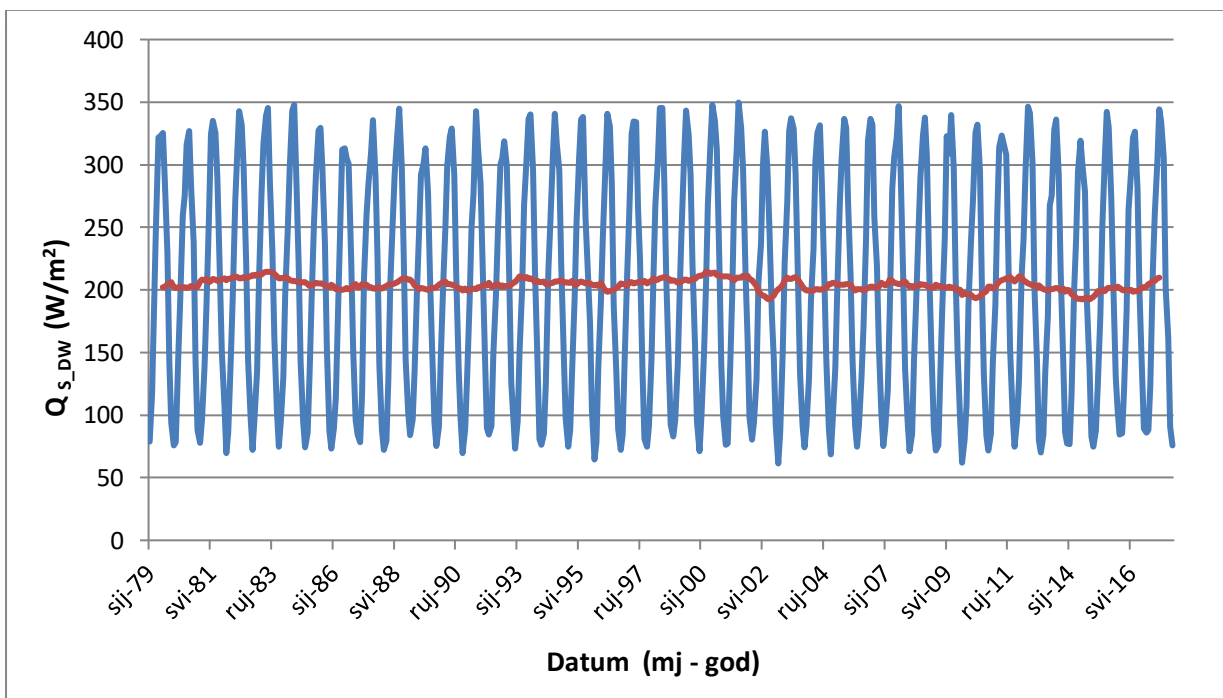
gdje je C_H Stantonov broj (empirijska konstanta ovisna o brzini vjetra i atmosferskoj nestabilnosti) aproksimiran konstantom iznosa 10^{-3} (Gill, 1982; Large, 1996), c_p je specifična toplota vlažnog zraka aproksimirana konstantom iznosa $1010 \left[\frac{J}{kgK} \right]$, T_a temperatura zraka, a T_w temperatura površine mora.

3. REZULTATI I RASPRAVA

3.1. Kratkovalno Sunčevo zračenje

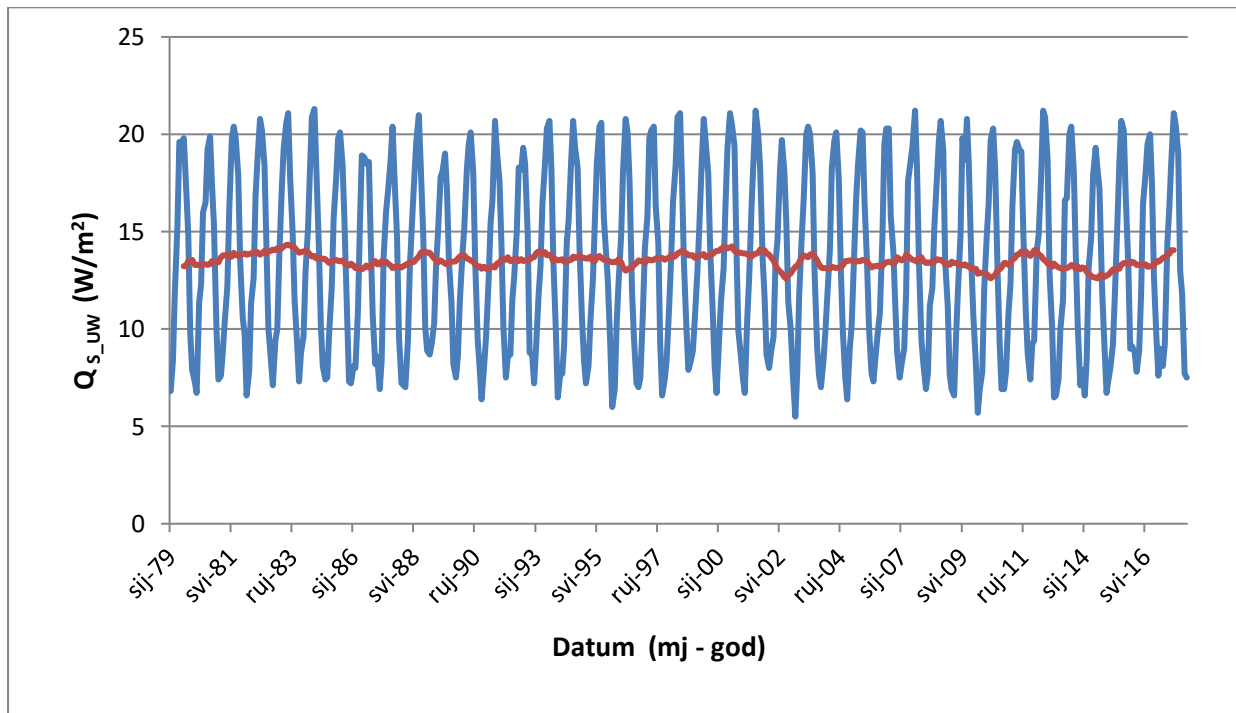
Za analizu podataka su korišteni linijski grafovi s označenim kliznim srednjakom kako bi bolje uočili bilo kakve nepravilnosti. Zbog preglednijeg prikaza, korišteni su mjesečni srednjaci.

Na Slici 2. uočava se izražen godišnji hod dolaznog kratkovalnog Sunčevog zračenja. Godišnji hod je posljedica izražene izmjene godišnjih doba na umjerenim zemljopisnim širinama. Zimi je dolazno kratkovalno Sunčevo zračenje najmanje (75 W/m^2 u prosincu, 88 W/m^2 u siječnju i 133 W/m^2 u veljači) a ljeti je dolazno kratkovalno Sunčevo zračenje najveće (lipanj 330 W/m^2 , srpanj 329 W/m^2 i kolovoz 288 W/m^2).



Slika 2. Srednje mjesečne vrijednosti dolaznog kratkovalnog Sunčevog zračenja za razdoblje od 1979. do 2017. godine (podaci NCEP-DOE Reanalize 2). Plavom bojom su označene srednje mjesečne vrijednosti, a crvenom bojom filtrirane vrijednosti dobivene primjenom kliznog srednjaka s duljinom prozora od 12 mjeseci.

Jednako kao i dolazno kratkovalno Sunčevo zračenje, povratno kratkovalno Sunčevo zračenje ima izražen sezonski hod (Slika 3.) koji nastaje kao posljedica izražene izmjene godišnjih doba na umjerenim zemljopisnim širinama. Zimi je povratno kratkovalno Sunčevo zračenje najmanje (7 W/m² u prosincu, 8 W/m² u siječnju i 10 W/m² u veljači) a ljeti je najveće (lipanj 20 W/m², srpanj 20 W/m² i kolovoz 18 W/m²).



Slika 3. Srednje mjesečne vrijednosti povratnog kratkovalnog Sunčevog zračenja za razdoblje od 1979. do 2017. godine (podaci NCEP-DOE Reanalize 2). Plavom bojom su označene srednje mjesečne vrijednosti, a crvenom bojom filtrirane vrijednosti dobivene primjenom kliznog srednjaka s duljinom prozora od 12 mjeseci.

Izražen godišnji hod kod dolaznog i povratnog kratkovalnog Sunčevog zračenja je direktna posljedica Zemljinog gibanja oko Sunca uslijed kojeg dolazi do promjena kuta upada Sunčevih zraka na zemljinu površinu.

Točan razlog izmjene godišnjeg doba leži u nagnutosti Zemlje u odnosu na ravninu ekliptike odnosno na ravninu po kojoj Zemlja kruži oko Sunca. Nagnutost Zemljinog ekvatora na ravninu ekliptike iznosi 23,5° i zbog nje Sunčeve zrake padaju na Zemlju pod različitim kutovima ovisno o dobu godine.

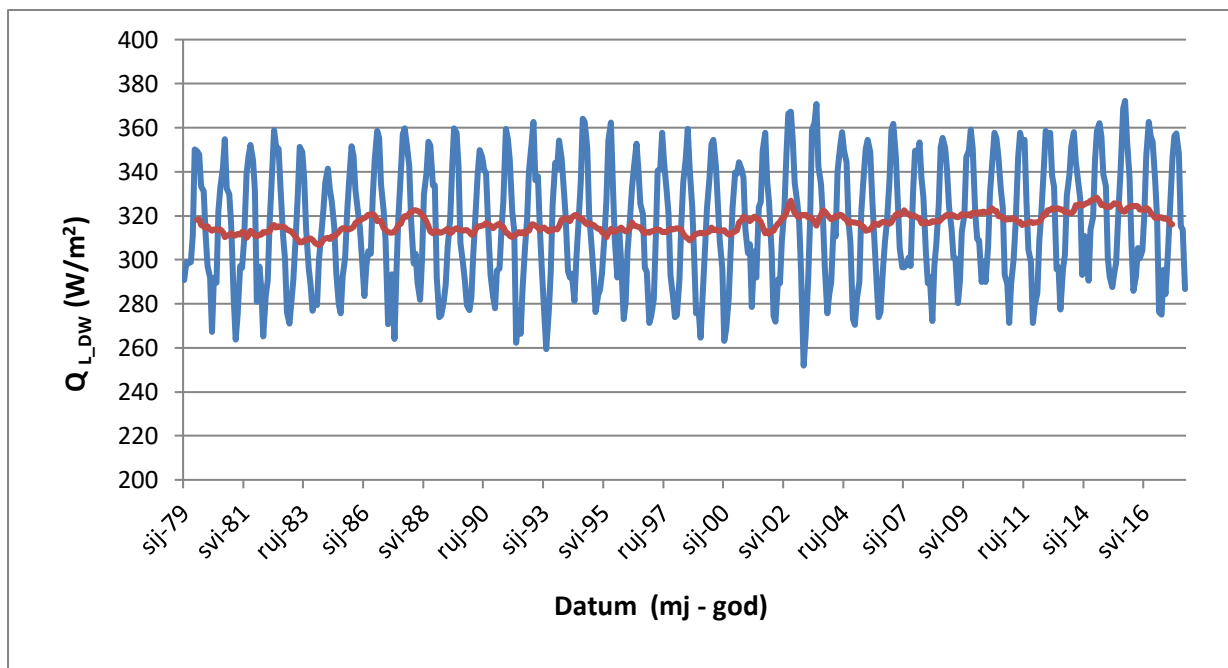
Na Jadranu je sunčevo zračenje najizraženije kada je na sjevernoj hemisferi klimatološko ljeto (od 20. ili 21.06. do 22. ili 23. 09.). Tada je Sunce najbliže sjevernoj obratnici - 23°26'22" zemljopisne širine sjeverno od ekvatora. Sunce ulazi u prostor sjeverne obratnice na datum 20/21. lipnja a taj se događaj naziva ljetni solsticij – suncostaj. Tu se Sunce zaokreće – obrće (od tuda i naziv „obratnica“) i počinje svoj povratak prema ekvatoru. Sjevernu obratnicu još nazivamo i Rakova obratnica (Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2014.). Rakova obratnica povezuje najsjevernije točke na zemlji na kojima Sunce dolazi u zenit odnosno gdje Sunčevo svjetlo za ljetnog suncostaja pada pod pravim kutom na Zemljinu površinu. Isto se događa na južnoj polutci u zimskom solsticiju (21/22. prosinca) na jednakoj udaljenosti od ekvatora odnosno na Jarčevoj obratnici. Upravo tada je Sunčevo zračenje na području Jadrana najmanje izraženo i godišnje doba koje vlada na sjevernoj hemisferi je zima (od 21. ili 22.12. do 20. ili 21. 03.).

3.2. Dugovalno zračenje Zemlje

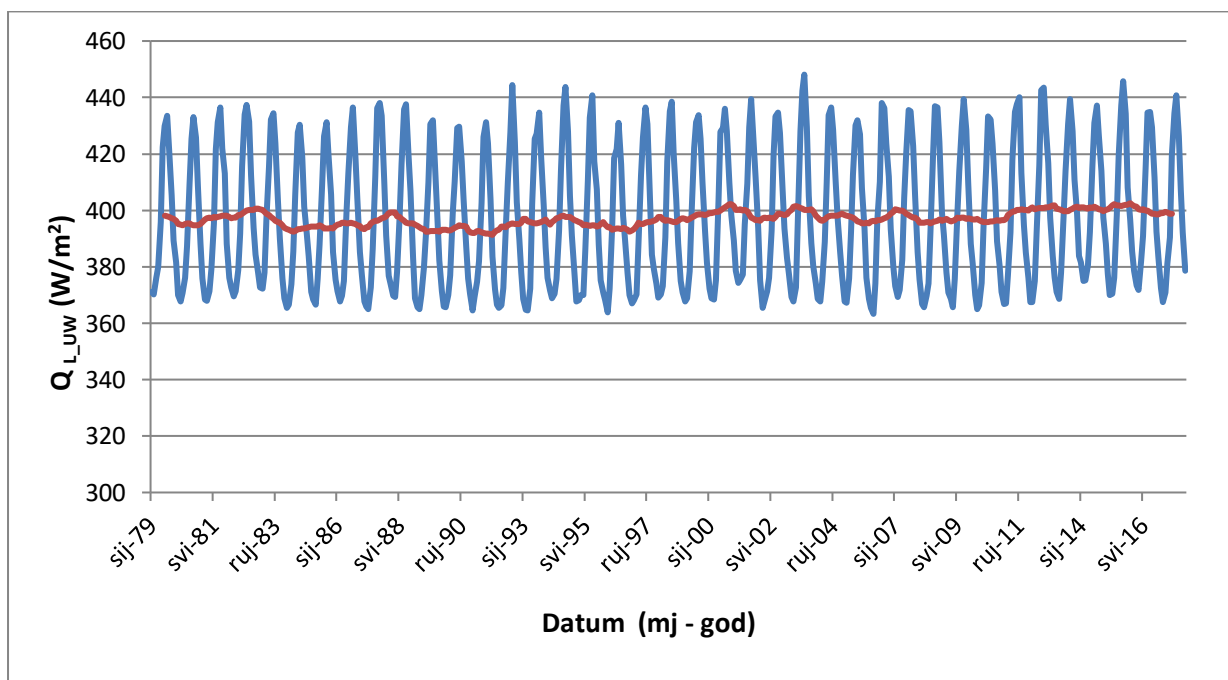
Na Slici 4. uočava se izražen godišnji hod povratnog dugovalnog zračenja Zemlje a koji nastaje kao posljedica izražene izmjene godišnjih doba na umjerenim zemljopisnim širinama. Zimi je povratno dugovalno zračenje Zemlje najmanje (293 W/m² u prosincu, 285 W/m² u siječnju i 280 W/m² u veljači) a ljeti je povratno dugovalno zračenje Zemlje najveće (lipanj 340 W/m², srpanj 353 W/m² i kolovoz 356 W/m²).

Jednako kao i za povratno dugovalno zračenje Zemlje i odlazno dugovalno zračenje Zemlje ima izražen sezonski hod (Slika 5.). Godišnji hod kojeg tu zamjećujemo je također nastao kao posljedica postojanja godišnjih doba na umjerenim zemljopisnim širinama. Zimi je odlazno dugovalno zračenje Zemlje najmanje (379 W/m² u prosincu, 372 W/m² u siječnju i 368 W/m² u veljači) a ljeti odlazno dugovalno zračenje Zemlje najveće (lipanj 415 W/m², srpanj 432 W/m² i kolovoz 437 W/m²).

Odlazno i povratno dugovalno zračenje Zemlje ovise o količini kratkovalnog Sunčevog zračenja jer upravo ono zagrijava Zemljinu površinu te joj daje energiju kojom Zemlja zatim zrači. Količina kratkovalnog Sunčevog zračenja ovisi o već navedenim faktorima ali zračenje koje dođe do Zemljine površine i koje ju zagrijava je samo 47,5 % ukupnog zračenja na vrhu atmosfere.



Slika 4. Srednje mjesečne vrijednosti povratnog dugovalnog zračenja Zemlje za razdoblje od 1979. do 2017. godine (podaci NCEP-DOE Reanalize 2). Plavom bojom su označene srednje mjesečne vrijednosti, a crvenom bojom filtrirane vrijednosti dobivene primjenom kliznog srednjaka s duljinom prozora od 12 mjeseci.



Slika 5. Srednje mjesečne vrijednosti odlaznog dugovalnog zračenja Zemlje za razdoblje od 1979. do 2017. godine (podaci NCEP-DOE Reanalize 2). Plavom bojom su označene srednje mjesečne vrijednosti, a crvenom bojom filtrirane vrijednosti dobivene primjenom kliznog srednjaka s duljinom prozora od 12 mjeseci.

Zemljina površina dio apsorbiranog zračenja troši na vlastito toplinsko zračenje (odlazno dugovalno zračenje Zemlje) te na senzibilne i latentne promjene topline koje se turbulentnim tokovima prenose u atmosferu. Najveći dio energije koju Zemlja gubi odlaznim dugovalnim zračenjem i turbulentnim tokovima topline apsorbira se u atmosferi. Dio apsorbirane energije (oko 70 %) se zatim vrati prema Zemlji kao povratno zračenje atmosfere i naziva se povratno dugovalno Zemljino zračenje a preostali dio odlazi dalje u svemir.

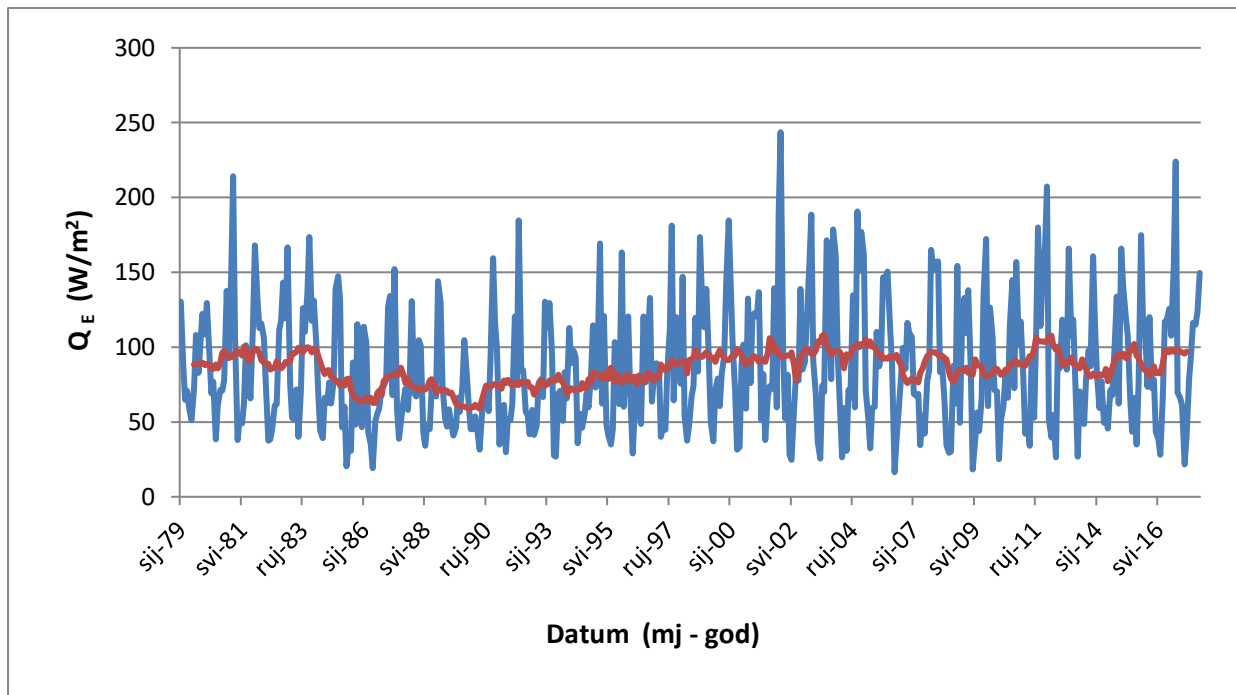
Dok odlazno dugovalno zračenje Zemlje ima u prosjeku ujednačena odstupanja od srednjaka, povratno dugovalno zračenje Zemlje ima dosta neujednačena odstupanja karakterizirana čestim naglim skokovima i ponorima. Ovo ukazuje da povratno zračenje ne ovisi isključivo o dolaznom kratkovalnom Sunčevom zračenju već i o nizu drugih faktora kao što su: količina stakleničkih plinova, količina sitnih čestica prašine – aerosola, oblačnost itd. Povratno dugovalno Zemljino zračenje je u globalu sve veće zbog povećanja efekta staklenika uvjetovanog povećanim industrijskim procesima, što dovodi do općeg zagrijavanja atmosfere, jačeg zagrijavanja Zemljine površine, a samim time i do klimatskih promjena.

3.3. Latentna energija

I kod latentne energije zamjećujemo postojanje sezonskog hoda nastalog kao posljedica postojanja godišnjih doba na umjerenim zemljopisnim širinama (Slika 6.). Tako je zimi izmjena latentne energije najveća (133 W/m^2 u prosincu, 120 W/m^2 u siječnju i 105 W/m^2 u veljači), a ljeti je najmanja (lipanj 50 W/m^2 , srpanj 65 W/m^2 i kolovoz 72 W/m^2).

Izmjenom latentne topline znatno upravljaju vjetrovi nastali pod utjecajem postojeće sinoptičke situacije tj. izmjena ciklona i anticiklona. Zimi je naše područje podložno većim promjenama vremena i snažnijim vjetrovima te je izmjena latentne topline značajnija.

U zimskom periodu preko promatranog područja prolazi veći broj ciklona te su one izraženije, za razliku od ljetnog razdoblja kada imamo veći utjecaj anticiklona i mirnije razdoblje obilježeno vjetrom „maestralom“ koji se razvija kao superpozicija etezija i zmorca (slab ljetni dnevni vjetar koji puše s kopna na more).



Slika 6. Srednje mjesečne vrijednosti latentne energije za razdoblje od 1979. do 2017. godine (podaci NCEP-DOE Reanalize 2). Plavom bojom su označene srednje mjesečne vrijednosti a crvenom bojom filtrirane vrijednosti dobivene primjenom kliznog srednjaka s duljinom prozora od 12 mjeseci.

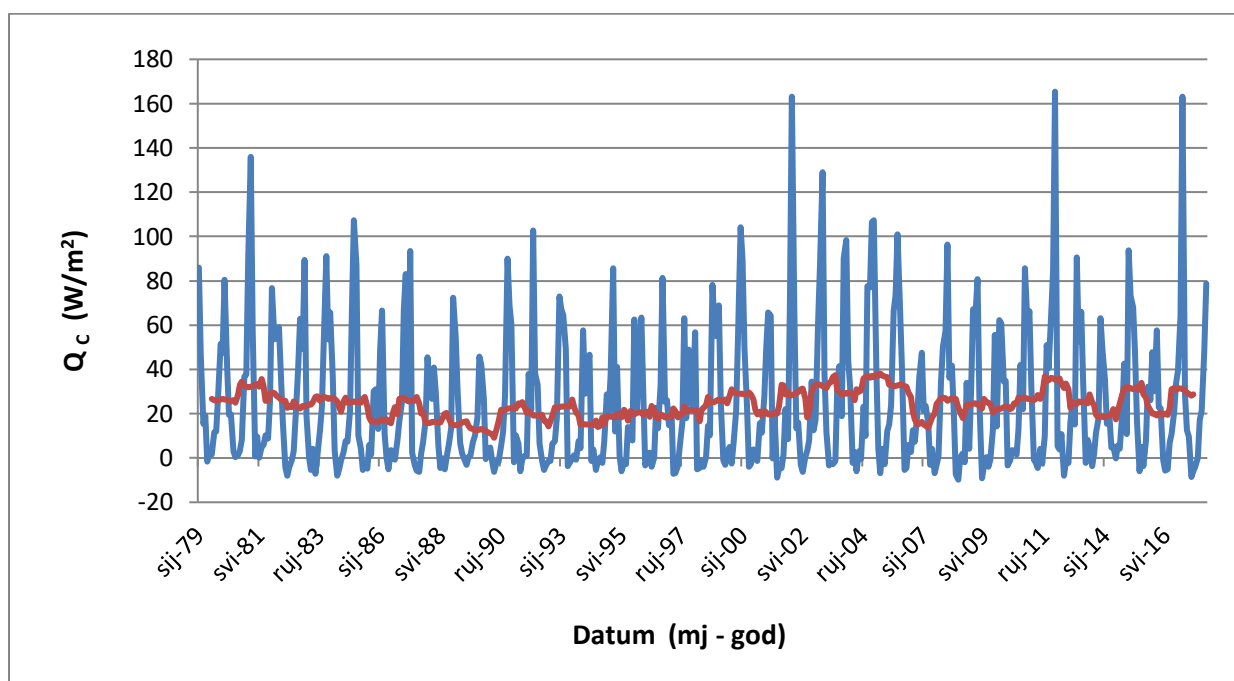
Velika i šarolika odstupanja izmjene latentne energije od srednjaka (Slika 6.) su najčešće uvjetovana čestim vjetrovima sa sjeveroistoka koji se u našem podneblju još nazivaju „bura“. Ti vjetrovi nad morem smanjuju zasićenost zraka vlagom te omogućuju isparavanje koje dovodi do smanjenja temperature površinskog sloja mora jer tada more gubi energiju tj. predaje je okolnom zraku. Kada more gubi energiju to se naziva izmjena latentne topline jer tada ono iz tekućeg stanja prelazi u plinovito što nazivamo evaporacija.

U razdoblju od sredine 1980-ih pa do sredine 1990-ih uočavamo naglo opadanje izmjene latentne energije koje je usko povezano s nedostatkom sjeveroistočnih vjetrova tih godina. Tijekom tog razdoblja klizni srednjak izmjene latentne energije niti u jednom trenutku nije prešao 100 W/m^2 . Naprotiv, uglavnom je bio između 50 W/m^2 i 75 W/m^2 .

Za razliku od ovog razdoblja, tijekom desetogodišnjeg razdoblja koje je uslijedilo, klizni srednjak izmjene latentne energije se nalazio u okviru 75 W/m^2 do 100 W/m^2 te je nerijetko i prelazio 100 W/m^2 .

3.4. Senzibilna energija

Sezonski hod senzibilne energije je postojan te je kao i kod ostalih promatranih parametara do sad, uzrokovan izmjenom godišnjih doba (Slika 7.). Zimi je izmjena senzibilne energije najveća (67 W/m² u prosincu, 66 W/m² u siječnju i 53 W/m² u veljači) a ljeti je izmjena senzibilne energije najmanja (lipanj -1 W/m², srpanj-1 W/m² i kolovoz 3 W/m²).



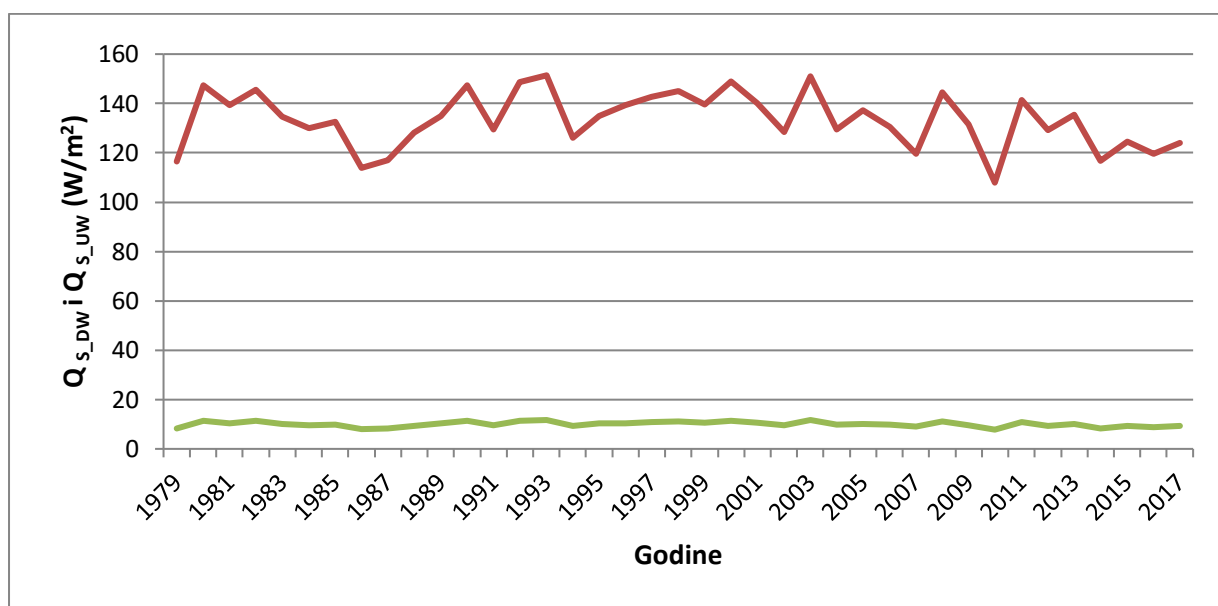
Slika 7. Srednje mjesečne vrijednosti senzibilne energije za razdoblje od 1979. do 2017. (podaci NCEP-DOE Reanalize 2). Plavom bojom su označene srednje mjesečne vrijednosti a crvenom bojom filtrirane vrijednosti dobivene primjenom kliznog srednjaka s duljinom prozora od 12 mjeseci.

Senzibilna energija je na Jadranu jedina koja može biti pozitivna i negativna. Negativnu komponentu objašnjavamo time što je more u određenim vremenskim periodima (najčešće i izraženije ljeti) hladnije od okolnog zraka te ono tada ne gubi toplinu već je prima tj. more je tada dobilo više topline nego što ju je prenijelo u atmosferu turbulentnim tokovima. Pozitivnu komponentu objašnjavamo time što je temperatura mora u prosjeku za nešto manje od 1°C viša od temperature zraka te zbog toga ono u globalu predaje toplinu okolišu. Najveća odstupanja i izmjene senzibilne energije uočavamo u periodu zime 2001/02, 2011/12 te 2016/17. Što navodi na zaključak da su neki periodi tih zima bili dosta hladniji od prosjeka te je more tada gubilo veliku energiju tj. toplinu kako bi zagrijalo zrak poviše. Tada je izmjena senzibilne energije iznosila više od 160 W/m².

3.5. Tokovi energije u veljači

Za primjer mjeseca koji bi pokazao na promjene i odstupanja od standardnih vrijednosti uzeta je veljača. Mjesec veljača odnosno drugi mjesec u godini je uzet iz razloga što je vrlo prevrtljiv, te meteorološki šarolik, što i je razlog zašto u pučkoj meteorologiji postoji uzrečica „veljača – prevrtača“. To je nadalje razdoblje velikih promjena u atmosferi te burnih procesa na granici atmosfera – more jer je upravo tada najhladnije, a zrak postaje postepeno topliji.

Analizirani su i grafički obrađeni podaci vezani uz kratkovalno Sunčevo zračenje, dugovalno zračenje Zemlje te izmjenu latentne i senzibilne energije (Slika 8.). Njihovom analizom je dobivena meteorološka slika navedenoga mjeseca za određeni vremenski period te su od godine do godine uočene promjene i odstupanja od normale.



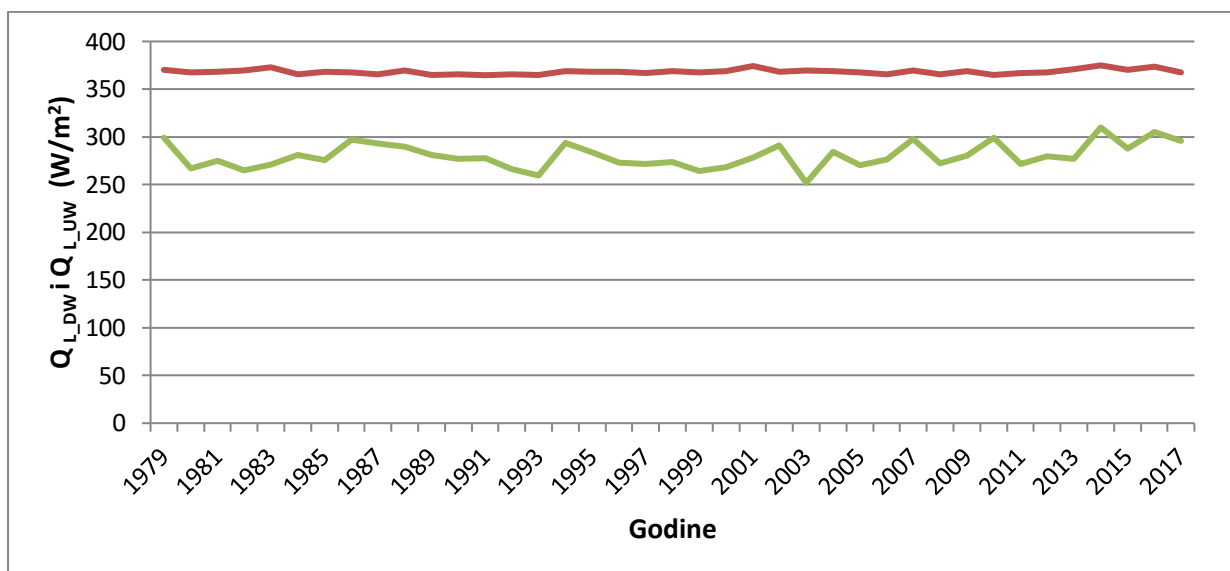
Slika 8. Dolazno i povratno kratkovalno Sunčevo zračenje za mjesec veljaču u vremenskom razdoblju od 1979. do 2017. godine. Crvenom bojom označeno je dolazno a zelenom bojom povratno kratkovalno Sunčevo zračenje.

U višedekadnom promatranom razdoblju za mjesec veljaču uočeno je da je količina dolaznog kratkovalnog Sunčevog zračenja bila različita a jednako tako je različito bilo i povratno kratkovalno Sunčevo zračenje (Slika 8.).

Kod dolaznog Sunčevog zračenja uočeno je postojanje izraženih amplituda dok ih kod povratnog Sunčevog zračenja nema te je ono, uz manje oscilacije, kroz čitav period iznosilo oko 10 W/m^2 . U samo dva slučaja količina dolaznog kratkovalnog zračenja je prešla 150 W/m^2 (1993. i 2003. godine). Za veljače tih dvaju godina bitno je izdvojiti velik broj dana s burom koja sa sobom uglavnom nosi vedro vrijeme pa je zato dolazno kratkovalno Sunčevo zračenje bilo izraženo.

Godine 2010. uočeno je vrlo nisko zračenje koje je iznosilo malo iznad 100 W/m^2 . Uzrok tome je vrlo kišna i ekstremno kišna veljača te godine zbog čega je Sunčevo zračenje do Zemljine površine tj. mora dolazilo slabijim intenzitetom.

Odlazno Zemljino dugovalno zračenje za mjesec veljaču je bilo uglavnom konstantno i iznosilo je oko $360 - 370 \text{ W/m}^2$ (Slika 9.). U veljači je dugovalno Zemljino zračenje najniže a razlog tome su prosječno i najniže temperature mora koje tada često budu ispod $10 \text{ }^\circ\text{C}$.

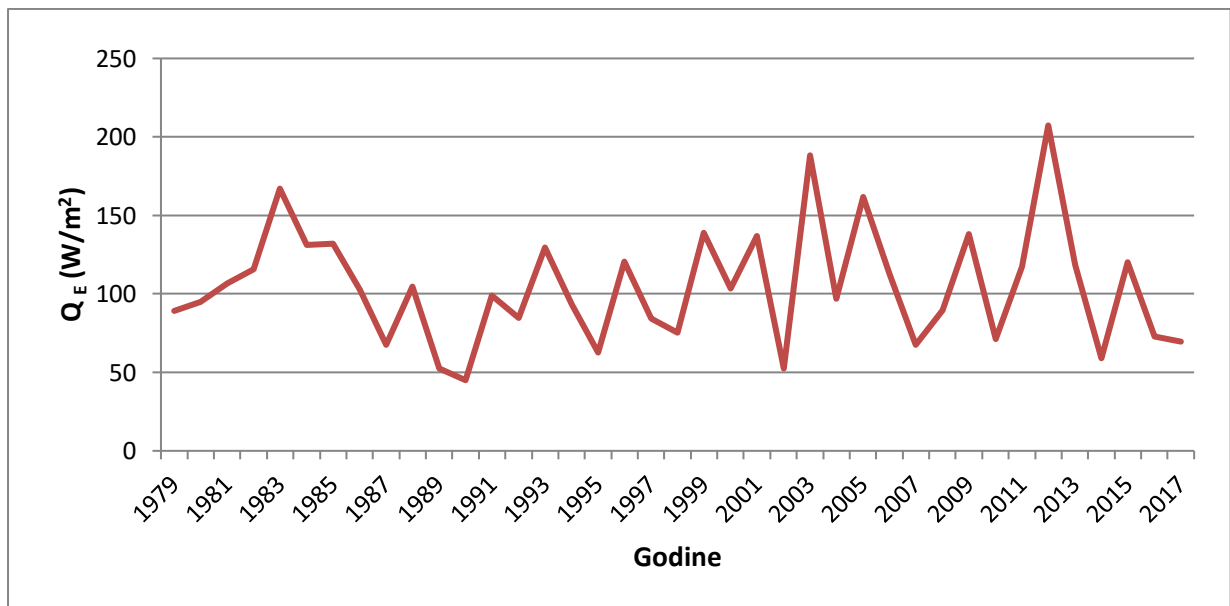


Slika 9. Odlazno i povratno dugovalno Zemljino zračenje za mjesec veljaču u vremenskom razdoblju od 1979. do 2017. godine. Crvenom bojom označeno je odlazno a zelenom bojom povratno Zemljino dugovalno zračenje.

Povratno dugovalno Zemljino zračenje je ipak bilo promjenjivo a ovisilo je najviše o oblačnosti. Tako je 2003. godine zbog dosta vedroga vremena uočeno vrlo malo povratno zračenje (oko 250 W/m^2), a 2010. godine zbog dosta oblaka zabilježeno je izraženo povratno zračenje (oko 300 W/m^2). Potrebno je istaknuti i veljaču 2014. godine kada je zbog dužih i češćih perioda puhanja jugoistočnog vjetrova (zvanog „jugo“) povratno zračenje bilo vrlo izraženo zbog česte oblačnosti.

Kada se govori o latentnoj energiji i njezinim izmjenama najbitnije je istaknuti veljaču 2012. godine gdje su uočene najveće promjene energije tj. topline uvjetovane snažnim vjetrovima sa sjeveroistoka (poznatim pod nazivom – bura) te niskim temperaturama zraka. Tijekom navedene veljače zabilježen je veliki broj dana s izraženom burom koja je hladila površinski sloj mora uklanjajući mu energiju putem evaporacije gubljenjem latentne topline.

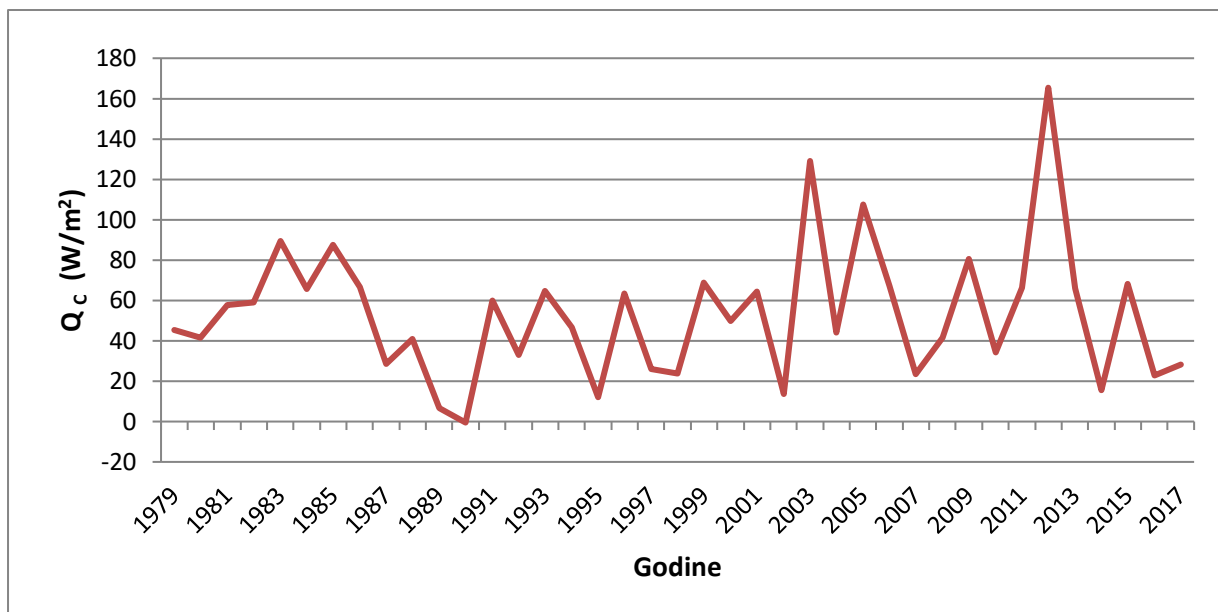
Izmjena latentne energije u veljači 2012. iznosila je preko 200 W/m² što je impresivna brojka (Slika 10.). Godine 1990. je izmjena latentne energije u periodu veljače iznosila manje od 50 W/m² što je najmanja izmjena u promatranom razdoblju (1979. – 2017.).



Slika 10. Izmjena latentne energije za mjesec veljaču u vremenskom razdoblju od 1979. do 2017. godine.

Senzibilna energija je svoje najveće izmjene (+ 165 W/m²) imala u veljači 2012. godine što bi značilo daje tada, za razliku od drugih promatranih godina (vremensko razdoblje 1979. – 2017.) more predalo najveću količinu energije atmosferi (Slika 11.). Da bi se energija iz mora predala u okolni zrak potrebna je razlika u temperaturi tj. temperatura mora trebala bi biti veća od temperature zraka. Veljača 2012. je po svemu sudeći bila temperaturno poprilično ispod svog prosjeka te je upravo to dovelo do ovakve izmjene senzibilne topline.

Bitno je istaknuti 1990. godinu kada je izmjena senzibilne energije prešla u negativu što znači da je tada more primilo više energije nego što je predalo. Takvu situaciju uzrokovala je nadprosječno topla veljača s čestim vjetrovima s juga.



Slika 11. Izmjena senzibilne energije za mjesec veljaču u vremenskom razdoblju od 1979. do 2017. godine.

3.6. Sezonski tokovi energije

Rezultati dobiveni računanjem su temeljito analizirani te su uočene sezonske fluktuacije ukupne promjene energije za promatranu točku u Jadranu (Tablica 2.). Tokom ranog proljeća (ožujak) te rane jeseni (rujan) u promatranoj točki ne dolazi do primanja ni do gubitka energije jer je tada gubitak energije putem dugovalnog Zemljinog zračenja, latentne energije i senzibilne energije izjednačen s dobivanjem energije kratkovalnim Sunčevim zračenjem. Tijekom kasnijeg proljeća i ljeta more u promatranoj točki nastavlja dobivati energiju zbog povećane količine energije kratkovalnim Sunčevim zračenjem. Za vrijeme kasne jeseni i zime more zbog smanjenog dolaznog kratkovalnog Sunčevog zračenja gubi energiju.

Ukupan rezultat izmjene tj. toka energije (Q_{UK}) dobiven je formulom koja sadržava sve četiri komponente zračenja: $Q_{UK} = Q_S + Q_L + Q_E + Q_C$. Valja istaknuti kako su za izmjenu topline kratkovalnim Sunčevim zračenjem (Q_S) prilikom izračuna ostavljeni pozitivni predznaci jer tada Zemlja dobiva energiju, dok su za ostale komponente: dugovalno Zemljino zračenje (Q_L), izmjena senzibilne energije (Q_C) i izmjena latentne energije (Q_E), postavljeni negativni predznaci jer je tada Zemlja gubila energiju. Zbog toga je osnovna formula za dobivanje toka energije prilikom izračuna (Tablica 2.) malo izmijenjena i prilagođena te glasi : $Q_{UK} = Q_S + (-Q_L) + (-Q_E) + (-Q_C)$ tj. $Q_{UK} = Q_S - (Q_L + Q_E + Q_C)$.

Tablica 2. Srednje mjesečne vrijednosti komponenti zračenja te njihov ukupan tok energije za točku u srednjem Jadranu u razdoblju od 1979. do 2017. godine.

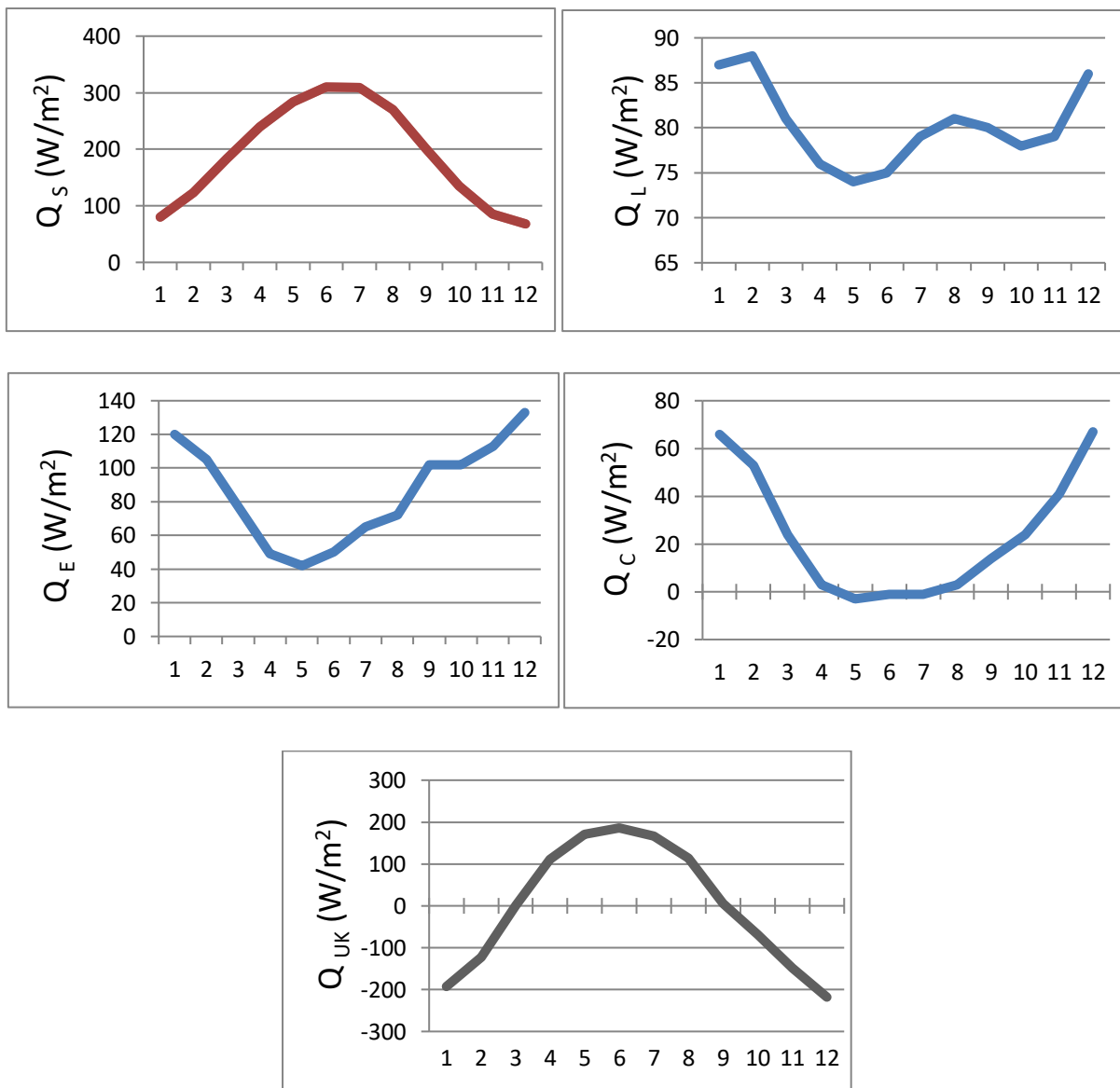
mjesec	Q_S	Q_L	Q_E	Q_C	Q_{UK}
Siječanj	80	87	120	66	-193
Veljača	123	88	105	53	-123
Ožujak	183	81	77	24	1
Travanj	239	76	49	3	111
Svibanj	284	74	42	-3	171
Lipanj	310	75	50	-1	186
Srpanj	309	79	65	-1	166
Kolovoz	270	81	72	3	114
Rujan	201	80	102	14	5
Listopad	135	78	102	24	-69
Studeni	85	79	113	41	-148
Prosinac	68	86	133	67	-218

U Tablici 3. prikazane su srednje mjesečne vrijednosti komponenti zračenja te njihove standardne devijacije. Najveća odstupanja su zabilježena kod latentne te senzibilne energije i to najviše u zimskim periodima.

Tablica 3. Srednje mjesečne vrijednosti i devijacije komponenti zračenja za točku u srednjem Jadranu za razdoblje od 1979. do 2017. godine.

mjesec	$Q_{S DW}$	$Q_{S UW}$	$Q_{L DW}$	$Q_{L UW}$	Q_E	Q_C
Siječanj	88 ± 7	8 ± 1	285 ± 12	372 ± 4	120 ± 38	66 ± 31
Veljača	133 ± 11	10 ± 1	280 ± 13	368 ± 3	105 ± 37	53 ± 33
Ožujak	196 ± 12	13 ± 1	288 ± 9	369 ± 3	77 ± 27	24 ± 19
Travanj	255 ± 12	16 ± 1	300 ± 8	376 ± 3	49 ± 18	3 ± 8
Svibanj	302 ± 14	18 ± 1	320 ± 6	394 ± 5	42 ± 12	-3 ± 5
Lipanj	330 ± 13	20 ± 1	340 ± 7	415 ± 6	50 ± 16	-1 ± 4
Srpanj	329 ± 12	20 ± 1	353 ± 8	432 ± 5	65 ± 19	-1 ± 4
Kolovoz	288 ± 14	18 ± 1	356 ± 7	437 ± 4	72 ± 16	3 ± 5
Rujan	215 ± 13	14 ± 1	345 ± 8	425 ± 5	102 ± 34	14 ± 9
Listopad	145 ± 10	10 ± 1	329 ± 8	407 ± 5	102 ± 36	24 ± 15
Studeni	93 ± 7	8 ± 1	312 ± 11	391 ± 4	113 ± 37	41 ± 20
Prosinac	75 ± 6	7 ± 1	293 ± 12	379 ± 5	133 ± 39	67 ± 28

Na Slici 12. prikazan je gubitak i primanje energije, gdje crvena linija prikazuje hod izmjene kada je more primalo energiju, a plava linija prikazuje hod izmjene kada je more gubilo energiju (osim u određenom godišnjem periodu kod izmjene senzibilne energije). U mjesecu lipnju je uočeno (Slika 12.) kako srednji Jadran u prosjeku dobiva najviše energije (165 W/m^2) a u prosincu kako gubi najviše energije (-218 W/m^2).



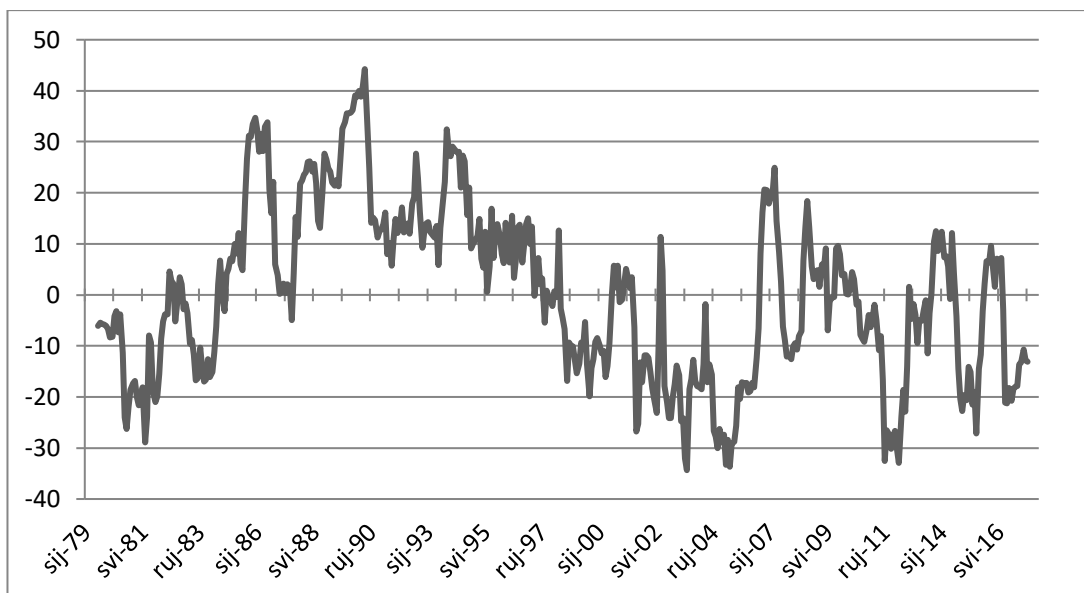
Slika 12. Prikaz srednjeg godišnjeg hoda izmjene energije u cjelini ili po komponentama putem linijskih grafikona. Crvenom linijom je prikazan godišnji hod kratkovalnog Sunčevog zračenja (Q_s), plavom linijom (redom) godišnji hod dugovalnog Zemljinog zračenja (Q_l), izmjena latentne energije (Q_e), izmjena senzibilne energije (Q_c), te sivom linijom sezonski hod ukupnog protoka energije (Q_{uk}).

Takav protok energije se poklapa s najdužim i najkraćim danima u godini, kada je u pitanju srednja geografska širina sjeverne hemisfere, gdje se i nalazi naša promatrana točka.

Kao što je navedeno srednji Jadran najviše energije dobiva u ljetnim a gubi u zimskim mjesecima (Slika 12.). Takvo ponašanje posljedica je dolaznog Sunčevog kratkovalnog zračenja. Sunce svojim kratkovalnim zračenjem u toplijem dijelu godine predaje srednjem Jadranu više energije tj. topline nego što ju srednji Jadran može izgubiti vlastitim dugovalnim zračenjem te promjenom senzibilne i latentne energije.

Bitno je istaknuti kako i senzibilna energija u jedva zamjetnoj količini može zagrijavati Zemlju u ljetnim mjesecima jer tada more ne zagrijava okolni zrak koji je više temperature od temperature mora, te toplina tj. energija ostaje u moru. Zimi, kada je energija dobivena Sunčevim kratkovalnim zračenjem zbog promjene godišnjeg doba smanjena, srednji Jadran gubi toplinu.

U analiziranoj točki u promatranom razdoblju Zemljina površina tj. more gubi u prosjeku 16.67 W/m^2 energije. Na Slici 13. uočava se da taj gubitak nije konstantan već ima izrazitu međugodišnju promjenjivost. Do 1983. more je gubilo, a između 1986. i 1997. godine je primalo energiju iz atmosfere. Nakon 2000. godine pa sve do 2007. godine more je gubilo energiju. Razdoblje nakon 2007 godine karakterizira veća međugodišnja promjenjivost te kraća razdoblja kada more u prosjeku gubi, odnosno prima energiju.

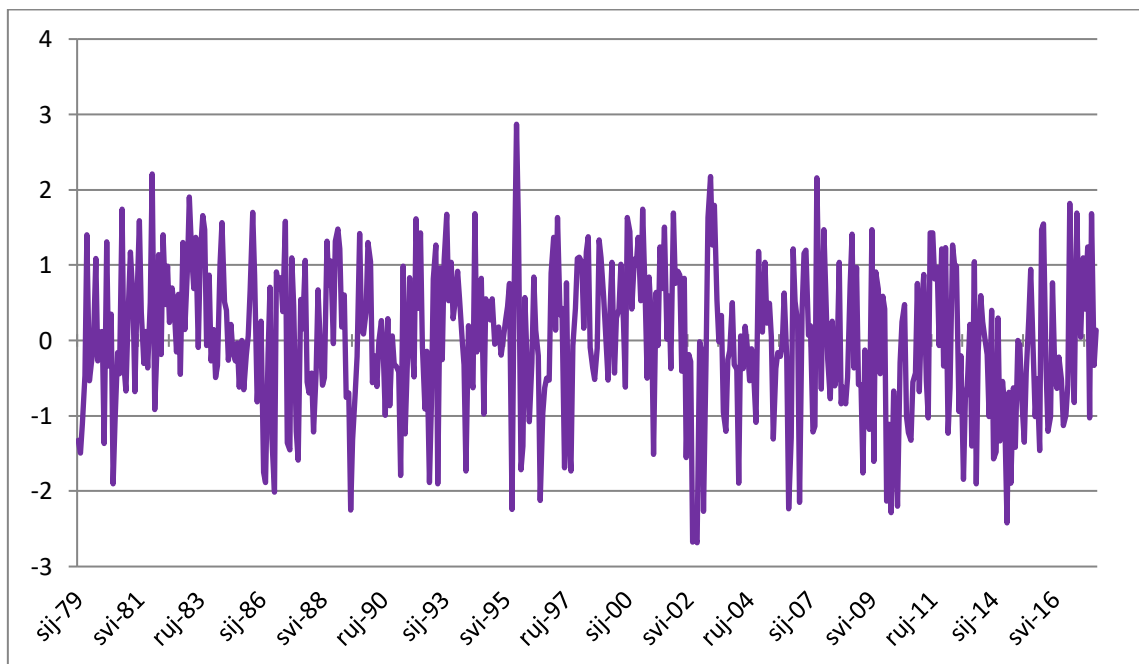


Slika 13. Klizni srednjak ukupnih tokova energije za razdoblje od 1979. do 2017. godine dobiveno iz NCEP-DOE Reanalize 2.

3.7. Anomalije tokova energije

Anomalije tokova energija daju sliku o tome koliko je pojedini podatak bio ekstreman bilo u pozitivnom ili u negativnom smislu. Podaci između ± 1 smatraju se normalnim, očekivanim i ne predstavljaju ekstremne vrijednosti, dok su podaci između ± 2 već manje očekivani te predstavljaju malo ekstremnije vrijednosti. Podataka između ± 1 ima 67%, dok podataka između ± 2 ima 95%, a one u intervalima $(-2, -1)$ i $(+1, +2)$ može se smatrati manjim anomalijama. Izrazite anomalije koje predstavljaju veće ekstremne vrijednosti su podaci veći od ± 2 .

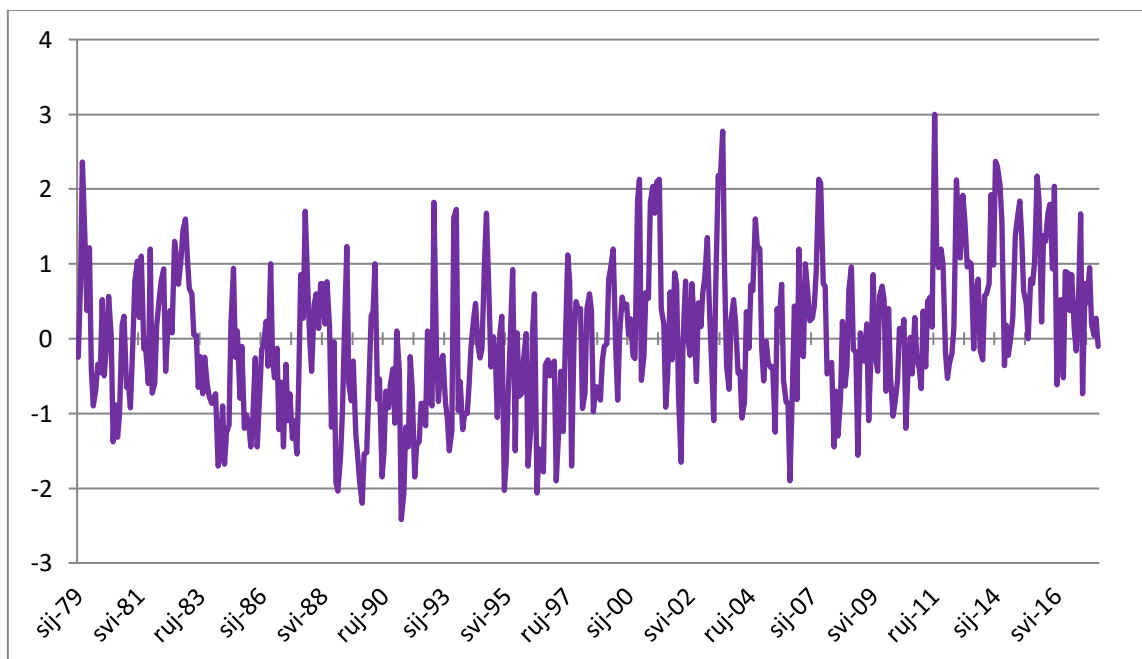
U vremenskom hodu anomalija dolaznog kratkovalnog zračenja (Slika 14.) ne uočavaju se izraziti ekstremi jer većina podataka se nalazi u intervalu ± 2 . Valjalo bi samo istaknuti listopad 1995. godine kada je zabilježena anomalija od skoro 3 jer je tada dolazno kratkovalno Sunčevo zračenje bilo dosta više od svog prosjeka za taj mjesec. Povratno kratkovalno Sunčevo zračenje prati trend odstupanja kao i dolazno kratkovalno Sunčevo zračenje.



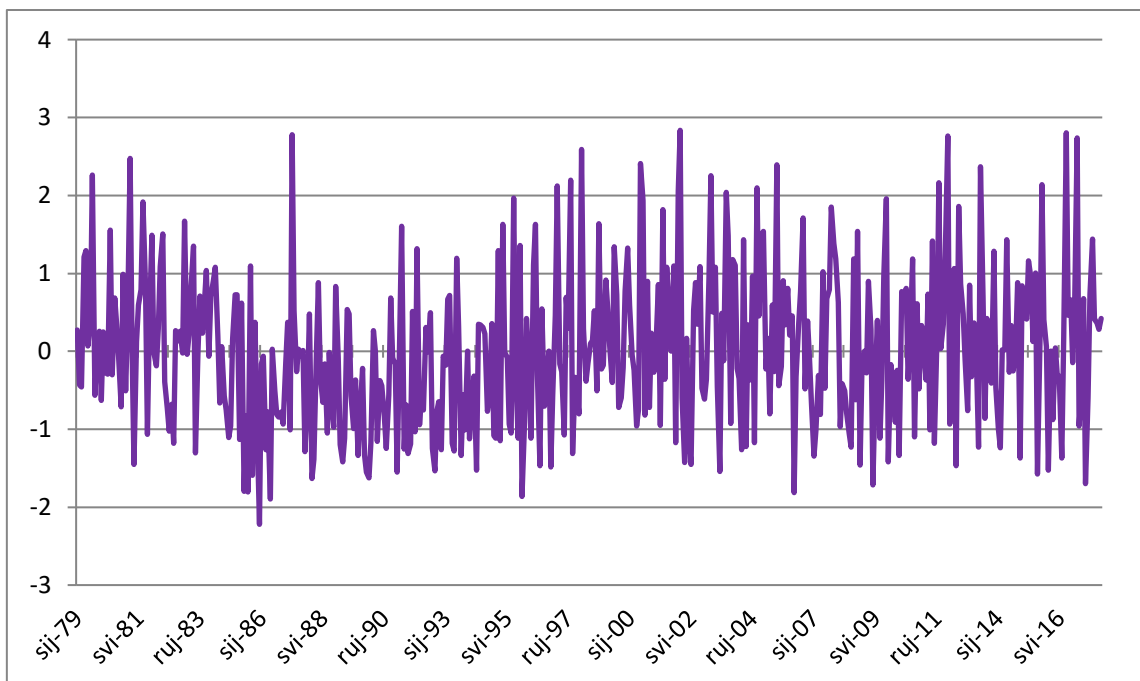
Slika 14. Srednje mjesečne anomalije dolaznog kratkovalnog Sunčevog zračenja za razdoblje od 1979. do 2017. godine dobiveno iz NCEP-DOE Reanalize 2.

Odlazno Zemljino dugovalno zračenje, jednako kao i dolazno kratkovalno Sunčevo zračenje, nema izražene ekstreme ali se uočava izražena međudekadna varijabilnost (Slika 15.). Tako do 2000. godine nije bilo izrazitih pozitivnih anomalija (većih od +2) a nakon 2000. godine izrazitih negativnih anomalija (manjih od -2). Uzrok takve raspodjele anomalije možda je u porastu površinske temperature mora kao najvažnijeg parametra koji određuje dugovalno zračenje.

Vremenski hod anomalija latentne energije (Slika 16.) je najpromjenjiviji. Ima mnogo ekstremnih vrijednosti te izražen međugodišnji hod. Uočava se da su do 1999. godine dominirale stabilne negativne anomalije, osobito u razdoblju od 1986. do 1995. godine. Potom nakon 2002. godine uočavaju se izrazite pozitivne anomalije. U razdoblju negativnih anomalija iz prvog dijela promatranog vremenskog razdoblja valjalo bi istaknuti jednu jače pozitivnu anomaliju od skoro 3 iz ožujka 1987. godine kada je zabilježena duplo veća izmjena latentne topline od prosjeka za taj mjesec. Objašnjenje za takav scenarij je pojava izražene evaporacije toga ožujka i prateći povišen gubitak latentne topline

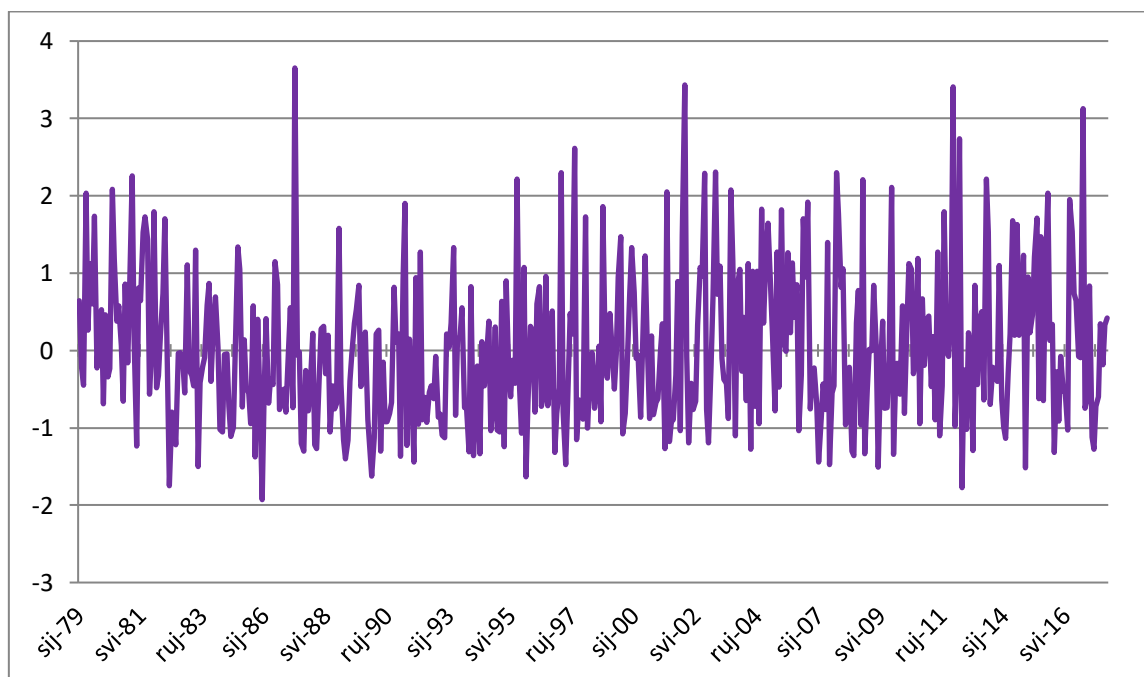


Slika 15. Srednje mjesečne anomalije odlaznog Zemljinog dugovalnog zračenja za razdoblje od 1979. do 2017. godine dobiveno iz NCEP-DOE Reanalize 2.



Slika 16. Srednje mjesečne anomalije latentne energije za razdoblje od 1979. do 2017. godine dobiveno iz NCEP-DOE Reanalize 2.

Vremenski hod senzibilne topline je također promjenjiv (Slika 17.). Jednako kao i za latentnu toplinu u razdoblju od 1985. do 1999. bio je stabilan i blago negativan, zatim postaje nestabilniji ali blago pozitivniji, što objašnjavamo naglijim i većim promjenama temperatura.



Slika 17. Srednje mjesečne anomalije senzibilne energije za razdoblje od 1979. do 2017. godine dobiveno iz NCEP-DOE Reanalize 2.

5. ZAKLJUČCI

U ovom radu analizirani su tokovi topline između atmosfere i mora u odabranoj točki na Jadranu. Promatrani parametri kod kojih su analizirani tokovi topline su dolazno i povratno kratkovalno Sunčevo zračenje, odlazno i povratno dugovalno zračenje Zemlje te latentna i senzibilna energija. Računanjem tokova topline navedenih parametara prikazan je ukupni tok topline, tj. energije na granici atmosfere i mora. Svi korišteni i upotrebljeni podaci u radu su preuzeti iz NCAR/NCEP reanalize meteoroloških polja. Za analizu u radu korišteni su podaci dobiveni NCEP globalnim spektralnim modelom a koji obuhvaćaju vremenski period od siječnja 1979. do prosinca 2017. godine. Kako bi se podaci što bolje obradili i analizirali izračunate su njihove srednje mjesečne vrijednosti te klizni srednjaci korištenjem prozora duljine 12 mjeseci. Nakon izračuna, svi dobiveni podaci su prikazani na linijskom grafu. Kod svih parametara uočena je ovisnost o godišnjim dobima tj. o kutu upada sunčevih zraka na promatranu točku smještenu u umjerenim zemljopisnim širinama. Kratkovalno Sunčevo zračenje je direktno uvjetovano položajem Sunca, isto kao i dugovalno zračenje Zemlje, dok su latentna i senzibilna toplina indirektno uvjetovane jer one najviše ovise u trenutnom stanju atmosfere i prevladavajućoj sinoptičkoj situaciji. Latentna toplina se najviše gubi prilikom jače evaporacije tj. isparavanja jer se tada more hladi, a to je najčešće tijekom zimskih mjeseci, a senzibilna toplina se gubi kad je zrak iznad mora hladniji od samog mora jer tada more predaje temperaturu okolišu što je također pretežito vezano za hladnije doba godine. Evaporacija je najčešće uzrokovana vjetrovima sa sjeveroistoka te je vrlo značajna zbog stvaranja sloja guste vode obogaćene kisikom koja tone u dublje slojeve te tako ventilira dubokomorska područja. Kako bi se objasnili ekstremi kod promatranih parametara za spomenuto vremensko razdoblje izračunate su, te na linijskom grafu prikazane, klimatske anomalije. Uz sezonske fluktuacije ukupne promjene energije na promatranj točki zabilježene su i promjene na dekadnoj vremenskoj skali. Nakon analize i obrade podataka pomoću poznate formule izračunat je i već spomenut ukupan tok topline tj. energije na granici atmosfere i mora te je dobiveno da je u analiziranoj točki unutar promatranog razdoblja more prosječno gubilo $16,67 \text{ W/m}^2$ energije. Količina energije koju more gubi ili prima vremenski je vrlo promjenjiva. Tok je pozitivan kada more prima energiju a negativan kad je predaje. Uočena su duža vremenska razdoblja kad je more primalo energiju (od 1986. do 1997.) i kad ju je gubilo (1979. – 1983. i 2000. – 2007.).

6. LITERATURA

- Andrassy M, Boras I, Švaić S. 2008. Osnove termografije s primjenom. Kigen, Zagreb, 172 str.
- Dobson F. W, Smith SD. 1985. Radiation at the Sea Surface. Q. J. R. Meteorol. Soc. 90(383), 43–56.
- Gill A. 1982. Atmosphere - Ocean Dynamics. Orlando, Academic Press, 662 str.
- Grbec B, Matić F, Beg Paklar G, Morović M, Popović R, Vilibić I. 2018. Long-term trends, variability and extremes of in situ sea surface temperature measured along the eastern Adriatic coast and its relationship to hemispheric processes. Pure and applied geophysics. 176, 1-16.
- Kalea M. 2014. Obnovljivi izvori energije. Energetski pogled, Kiklos, Zagreb, 334 str.
- Kimball H. 1928. Amount of Solar Radiation that Reaches the Surface of the Earth on the Land and on the Sea and Methods by which it is Measured. Mon. Rea. Rev. 56, 393–399.
- Kulišić P, Lopac V. 2003. Elektromagnetne pojave i struktura tvari. Školska knjiga, Zagreb, 524 str.
- Laevastu T. 1967. Cloud Factor in Long-Wave Radiation Formulas. J. Geophys. Res. 72, 4277–4285.
- Large W. 1996. An Observation and Numerical Investigation of the Climatological Heat and Salt Balances at OWS Papa. J. Climate 9, 1856–1876.
- Leksikografski zavod Miroslav Krleža. 2014. Hrvatska enciklopedija. Dostupno sa: www.enciklopedija.hr, pristupljeno: srpanj, 2018.
- Lumb F. 1964. The Influence of Cloud on Hourly Amount of Total Solar. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, vol. 90, issue 383, 43-56.
- Lutgens FK, Tarbuck EJ, Tasa DG. 2015. The Atmosphere: An Introduction to Meteorology. Pearson, 13 edition, 528 str.
- Matić F, Kovač Ž, Vilibić I, Mihanović H, Morović M, Grbec B, Leder N, Džoić T. 2017. Oscillating Adriatic temperature and salinity regimes mapped using the Self-Organizing Maps method. Continental shelf research, 132, 11-18.
- Maurer EP, O'Donnell GM, Lettenmaier DP, Roads JO. 2001. Evaluation of the land surface water budget in NCEP/NCAR and NCEP/DOE reanalyses using an off-line hydrologic model. J. Geophys. Res. Atmospheres, 106(D16), 17841–17862.

- Orlić M, Gačić M, LaViolette PE. 1992. The current sand circulation of the Adriatic Sea. *Oceanologica Acta*, 15, 2, 109-124.
- Penzar B. i sur. 1996. *Meteorologija za korisnike*. Školska knjiga, 274 str.
- Sijerković M. 1991. Efekt staklenika i njegov utjecaj na klimatske promjene. Pomorski zbornik, *Annals of maritime studies*. 29; 523-547.
- Stacey FD, Davis PM. 2008. *Physics of the Earth*. Cambridge University Press, 4 edition, 548 str.
- Tabata Y. 1964. Insolation in Relation to Cloud amount and Sun's Altitude (in *Studies on Oceanography*, edited by K. Yoshida). Tokyo, University of Tokyo, str. 202-210.
- Vilibić I, Mihanović H, Janeković I, Denamiel C, Poulain PM, Orlić M, Dunic N, Dadić V, Pasarić M, Muslim S, Gerin R, Matić F, Šepić J, Maury E, Kokkini Z, Tudor M, Kovač Ž, Džoić T. 2018. Winter time dynamics in the coastal north eastern Adriatic Sea: the NadEx 2015 experiment. *Ocean science*. 14(2), 237-258.
- Vilibić I, Orlić M. 2002. Adriatic water masses, their rates of formation and transport through the Otranto Strait. *Deep-Sea Research I: Oceanographic Research Papers*, 49(8), 1321-1340.